

Вестник
Донского государственного технического университета

Теоретический и научно-практический журнал 

Vestnik of Don State Technical University

Том 17 № 3 2017
Vol. 17 no. 3 2017

ISSN 1992-5980 
eISSN 1992-6006

1 Механика
Mechanics

2 Машиностроение и машиноведение
Machine Building and Machine Science

3 Информатика, вычислительная техника и управление
Information Technology, Computer Science, and Management

4 Процессы и машины агроинженерных систем
Processes and Machines of Agro-Engineering Systems

5 Безопасность деятельности человека
Safety of Human Activity

DOI 10.23947/1992-5980

vestnik.donstu.ru



Теоретический и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
Июль-сентябрь 2017 г.

Учредитель и издатель — Донской государственный технический университет
Главный редактор — председатель Редакционного совета Б. Ч. Месхи

Включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25.07.2014 г. №793 с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03.06.2015 г. №560 **(Перечень ВАК)**

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования **(РИНЦ)**, а также в международной базе **EBSCO**

Является членом **Cross Ref**

Над номером работали: И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 29.09.2017., дата выхода в свет 30.09.2017.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать офсетная.
Усл. печ. л. 22,6. Тираж 1000 экз. Заказ № 30/09 Цена свободная.
Адрес редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.
Адрес издателя:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.
Адрес полиграфического предприятия:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.
http://science.donstu.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66004 от 06.06.2016., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций



Theoretical and Scientific-Practical Journal

4 issues a year
July — September 2017

Founder and publisher — Don State Technical University

Included in the list of peer-reviewed scientific editions where the basic research results of doctoral, candidate's theses should be published in accordance with order of Ministry of Education and Science of RF no. 793, July 25, 2014, as amended by order of the Ministry of Education and Science of RF no.560, June 3, 2015.

The journal is indexed and archived in the Russian Science Citation Index (RSCI), and in EBSCO International Database.

The journal is a member of Cross Ref

The issue is prepared by: Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)
Passed for printing 29.09.2017, imprint date 30.09.2017.
Format 60×84/8. Font «Times New Roman». Offset printing.
C.p.sh. 22.6. Circulation 1000 cop. Order 30/09 Free price.

Editorial Board's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.

Publisher's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.

Printery address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.

http://science.donstu.ru

Certificate of mass media registration ПИ № ФС 77-66004 of 06.06.2016. issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 621.833 10.23947/1992-5980-2017-17-3-5-13

К оценке контактно-усталостной долговечности химико-термоупрочненных зубчатых колес*

Н. П. Онишков[1], В. И. Короткин[2]**

[1] Академия строительства и архитектуры ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2] Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

To estimation of contact-fatigue durability of thermo-chemically strengthened gears***

N. P. Onishkov[1], V. I. Korotkin[2]**

[1]Academy of Construction and Architecture, DSTU, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2]Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена уточнению прочностных характеристик диффузионного слоя цементованных (Ц) и нитроцементованных (Нц) эвольвентных зубчатых колес. Регламентируемые ГОСТ 21354-87 зависимости предела контактной выносливости стальных деталей от твердости $\sigma_{H\lim}$ в области ограниченной (до 10–12 млн циклов) долговечности завышены.Цель работы — определить максимально допустимый уровень нагрузки эвольвентных зубчатых передач в условиях действия альтернативных форм отказа и область корректного применения рекомендаций ГОСТ 21354-87.

Материалы и методы. В поверхностно упрочненных деталях протекают одновременно глубинные и поверхностные процессы контактного разрушения с принципиально различными механизмами контактно-усталостной долговечности. Лидирующий вид разрушения определяется комплексом факторов, основные из которых — уровень напряженности и свойства приповерхностных слоев материала. Нагрузочная способность диффузионного слоя исследована на основе экспериментальных данных по методике оценки прочности структурно неоднородного материала с использованием обобщенного критерия предельного состояния Писаренко — Лебедева.

Результаты исследования. Учет влияния пластических свойств материала и его изменения в пределах диффузионного слоя позволил существенно повысить достоверность прогнозирования уровня нагрузочной способности цементованных и нитроцементованных зубчатых передач по контактной прочности. Подтверждено наличие порогового значения твердости рабочей поверхности зубьев колес на уровне 60–61 единиц по Роквеллу, превышение которого ведет к снижению контактно-усталостной долговечности. Приведена оценка влияния параметра пластичности на уровень нагрузочной способности и варьирование величины этого параметра при различных видах химико-термической обработки (ХТО). В области ограниченной долговечности опережающими являются глубинные контактные разрушения. И пределы контактно-усталостной долговечности по показаниям поверхностного выкрашивания должны быть ориентированы на допускаемое нормальное контактное глубинное напряжение.

Introduction. The specification of the strength characteristics of the diffusion layer of carburized (C) and nitro-carburized (NC) involute gears is described. Regulated by GOST 21354-87, the dependence of the surface endurance limit of steel parts on hardness $\sigma_{H\lim}$ in the region of finite (up to 10-12 million cycles) life is overstated. The work objective is to determine the maximum allowable load level of the involute gearing under the conditions of alternative failure forms and the area of correct application of GOST 21354-87 recommendations.

Materials and Methods. In the case-hardened parts, both deep and surface processes of contact fracture occur simultaneously. However, these processes have essentially different mechanisms of contact-fatigue durability with fundamentally different mechanisms of the contact-fatigue life. The high-end fracture mode is determined by a variety of factors, the key ones being the level of intensity and the properties of the near-surface layers of the material. The loading capacity of the diffusion layer is investigated on the basis of the experimental data by the strength assessment procedure of a structurally inhomogeneous material. Here, Pisarenko-Lebedev generalized criterion of limiting state is used.

Research Results. Consideration of the effect of the plastic properties of the material and its variation within the diffusion layer has allowed significantly increase the forecasting validity of the loading capacity level of the carburized and nitro-carburized gears for contact strength. The occurrence of the threshold value of the working surface hardness of the wheels teeth is confirmed at the level of 60–61 Rockwell units. This level increase leads to the decrease in contact-fatigue life. The plasticity parameter impact on the capability level and the variation of this parameter value for different types of the thermo-chemical treatment (TCT) is assessed. In the finite life area, deep contact fractures are leading. And the limits of contact fatigue life upon surface pitting readings

Механика

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 9.4726.2017/8.9).

**E-mail: onishkova1@yandex.ru, korotkin@math.rsu.ru

*** The research is done with the support from Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. 9.4726.2017/8.9).

Обсуждение и заключение. С экспериментальными данными полученные результаты качественно согласуются, но в ряде случаев несколько превышают их. Необходимы исследования по величине параметра пластичности и его изменению в зависимости от химического состава стали и вида ХТО. Но уже на данном этапе полученные результаты могут быть использованы при проектировании тяжело нагруженных поверхностно упрочненных зубчатых передач при назначении твердости поверхности и толщины диффузионного слоя. Область применения — передачи бортовых редукторов тракторов, нефтедобывающих станков-качалок, горнодобывающего и подъемно-транспортного оборудования.

should be oriented to the allowed normal deep contact stress.

Discussion and Conclusions. The obtained results are in qualitative agreement with the experimental data, but they exceed them a little in some cases. Studies on the plasticity parameter value and its variation depending on the chemical composition of the steel and the TCT type are needed. But already at this stage, the results obtained can be used in the design of heavy-loaded case-hardened gears to determine the surface hardness and the diffusion layer thickness. The application domain includes the tractor track gear transmissions, oil-producing beam engines, mining and handling facilities.

Ключевые слова: зубчатая передача, контактная прочность, химико-термическая обработка, конкурирующие виды отказов, упрочненный слой, твердость, критерии прочности.

Keywords: gear, contact strength, thermo-chemical treatment, competing failure modes, hardened layer, hardness, strength criteria.

Образец для цитирования: Онишков, Н. П. К оценке контактно-усталостной долговечности химико-термоупрочненных зубчатых колес / Н. П. Онишков, В. И. Короткин// Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 5–13.

For citation: N.P. Onishkov, V.I. Korotkin. To estimation of contact-fatigue durability of thermo-chemically strengthened gears. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 5–13.

Введение. Несмотря на многолетние исследования, проблема контактно-усталостной долговечности элементов машин и механического оборудования не теряет актуальности. Методы ее прогнозирования довольно условны, а результаты противоречивы.

В настоящее время в инженерной практике используются кусочно-линейные зависимости предела контактной выносливости стальных деталей от твердости: $\sigma_{H\lim} = 23\,H_{HRCэ}$ по ГОСТ 21354-87 [1] или $\sigma_{H\lim} = 2{,}3\,H_{HB}$ по ИСО 6336 [2]. Эти зависимости соответствуют усредненным значениям пределов контактной выносливости. Однако рекомендации [1] для случаев цементации и нитроцементации распространены на интервал твердостей 56–65 $H_{HRCэ}$. Между тем ряд нормативов ограничивают весьма высокие весовые коэффициенты влияния твердости уровнем 58–60 $H_{HRCэ}$, указывая, что превышение этого уровня дает противоречивые результаты. Кроме того, в области ограниченной долговечности рекомендации [1] представляются неоправданно завышенными. Так, при числе циклов нагружения $N = 10^7$ и твердости 60 $H_{HRCэ}$ предел контактной выносливости $\sigma_{H\lim}$ = 2100 МПа. При этом даже эвольвентные передачи со шлифованными зубьями, работающие в благоприятном упругогидродинамическом режиме смазки, поражаются прогрессирующим питтингом при напряжениях σ_H > 1500–1600 МПа уже на ранних стадиях эксплуатации. Однако опережающими могут явиться альтернативные виды отказа [3, 4].

Исследования последних лет показали необходимость корректировки стандарта — в частности, снижения $\sigma_{H\lim}$ в области длительной прочности [5], аналогичной представленной в стандарте ISO 6336 [2]. Верхний предел твердости зубьев ограничен уровнем 62–63 $H_{HRCэ}$ [2, 6] по причине опасности хрупкого разрушения, однако прогнозирование этого вида отказа пока носит преимущественно качественный характер. Уточнение количественных оценок прочности связано с учетом пластических свойств материала и их изменением при термической и химико-термической обработке (ХТО). Такой подход был использован в работах [7, 8], продолжением которых является настоящая статья.

Постановка задачи. Основным видом контактных повреждений эвольвентных зубьев считается усталостное выкрашивание их рабочих поверхностей, т. н. питтинг (рис. 1).

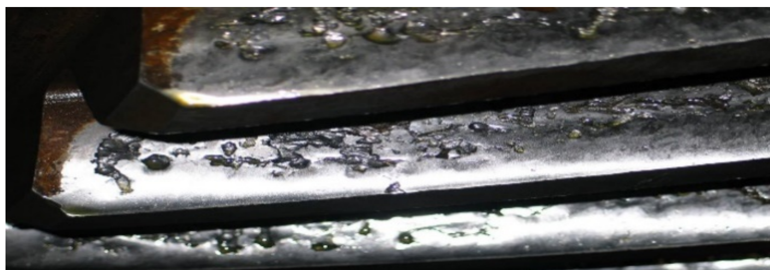


Рис. 1. Типичный вид поверхностного выкрашивания (питтинга)

Fig. 1. Typical appearance of surface pitting

Но поскольку максимальные эквивалентные напряжения локализованы на определенной глубине, то при высоких контактных напряжениях, особенно при поверхностном упрочнении деталей, возможно опережающее развитие подповерхностных дефектов — глубинных контактных разрушений (ГКР, рис. 2) как в упрочненном слое, так и в области перехода к неупрочненной сердцевине, т. е. отрыв слоя.

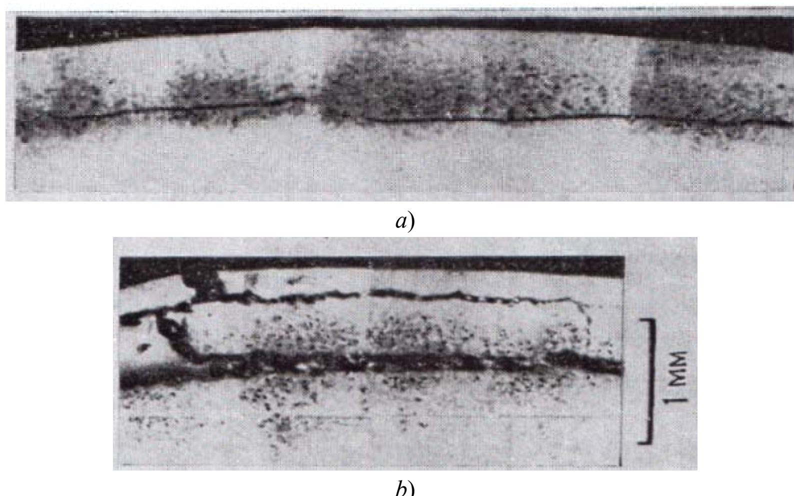


Рис. 2. Глубинные контактные разрушения, поперечные микрошлифы [9]: в эффективной зоне (*a*); на двух уровнях (в эффективной зоне и в подслое) (*b*)

Fig. 2. Deep contact fracture, transverse microsections [9]: in effective zone (a); at two levels (in effective zone and in sub-layer) (b)

И глубинные, и поверхностные процессы протекают одновременно, но механизмы контактно-усталостной долговечности этих процессов принципиально различны, и лидирующий вид разрушения определяется комплексом факторов, основные из которых — уровень напряженности и свойства приповерхностных слоев материала.

Цель работы — определить максимально допустимый уровень нагрузки эвольвентных зубчатых передач в условиях действия альтернативных форм отказа и область корректного применения рекомендаций [1]. Объект исследования — зубчатые колеса и модели (ролики), упрочненные ХТО. Аппарат исследования — методика оценки прочности структурно неоднородного материала на базе обобщенного критерия предельного состояния Писаренко — Лебедева [10].

Нагрузочная способность в области ограниченной долговечности деталей, упрочненных ХТО. На графиках (рис. 3) приведены экспериментальные данные по контактно-усталостной долговечности цементованных и нитроцементованных деталей (зубчатых шестерен и роликов).

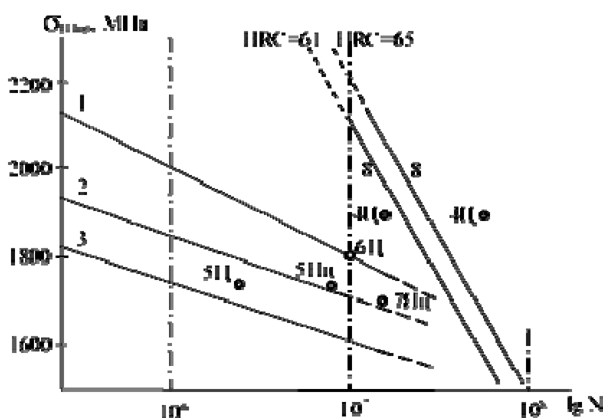


Рис. 3. Контактно-усталостная долговечность цементованных (Ц) и нитроцементованных (Нц) зубчатых шестерен и роликов: 1, 2, 3 — ролики CD-30, CC-60 и CD-60 соответственно, Ц — ГКР [9]; 4 — шестерни модуля *m* = 4,0 мм, Ц — ГКР, питтинг [3]; 5 — шестерня *m* = 6,5 мм, сталь 20ХН3А, Ц — ГКР, Нц — питтинг [11]; 6 — шестерня *m* = 6,0 мм, сталь 20ХН3А, Ц — ГКР; 7 — шестерня *m* = 6,0 мм, сталь 20ХН3А, Нц — питтинг [12]; 8 — легированные Ц и Нц эвольвентные шестерни по пределу контактной выносливости при твердости рабочих поверхностей зубьев 61 и 65 HRC на базе $N = 10^7$ циклов [1]

Fig. 3. Contact fatigue life of carburized (C) and nitro-carburized (NC) gears and rollers: 1, 2, 3 — rollers CD-30, CC-60 and CD-60, respectively, Ц — DCF [9]; 4 — modular gears m = 4,0 mm, Ц — ГКР, pitting [3]; 5 — gear m = 6,5 mm, steel 20ХН3А, Ц — DCF, Нц — pitting [11]; 6 — gear m = 6,0 mm, steel 20ХН3А, Ц — DCF; 7 — gear m = 6.0 mm, steel 20ХН3А, Нц — pitting [12]; 8 — doped involute gears C and NC in contact endurance limit at teeth face hardness of 61 and 65 HRC based on $N = 10^7$ *cycles [1]*

Здесь 1, 2, 3 — ролики из хромомолибденовой стали [9]: 1 — ролики CD-30 диаметром D = 30 мм с твердостью поверхности $H_0 = 795HV$, эффективной глубиной упрочнения (до твердости 550 HV) h_{te} = 1,08 мм; 2 — ролики CC-60, D = 60 мм, $H_0 = 838HV$, h_{te} = 2,30 мм; 3 — ролики CD-60, D = 60 мм, $H_0 = 850HV$, h_{te} = 1,37 мм. Твердость $H_к$ сердцевины у всех образцов около 260HV.

Для роликов CD-30 и CC-60 при действующих напряжениях σ_H = 1717–2158 МПа и расчетной полуширине площадки контакта $b_H \le$ 0,28 мм (CD-30) и $b_H \le$ 0,58 мм (CC-60) причиной выхода образцов из строя явились глубинные контактные разрушения на глубинах h = 0,10–0,39 мм. При этом твердость слоя в данном интервале изменялась от 790 HV до 760 HV CD-30. Твердость слоя в интервале h = 0,16–0,72 мм изменялась от 835 HV до 810 HV (CC-60). Отношение $h_{te} / b_H > 3$ гарантировало, что недостаточная прочность подслоя не оказывает негативное влияние на уровень нагрузочной способности детали, т. е. отказ явился следствием исчерпания несущей способности собственно упрочненного слоя. Прочность образцов CB-60 была существенно ниже вследствие слабости подслоя и возникновения очагов разрушения на двух уровнях — в эффективной и переходной зонах.

Точного соотношения чисел твердости по Виккерсу и по другим шкалам не существует, приближенно 760–800 $HV \approx$ 61–62 $HRC_э$. При числе циклов нагружения $N = 10^7$ и $H_0 = 61HRC_э$ $\sigma_{H\lim} = 23H_{HRCэ} \cdot Z_N$ МПа. Принимая рекомендуемые [1] для данного уровня твердости коэффициент долговечности Z_N = 1,513, коэффициент запаса прочности $S_{H\min}$ = 1,2, коэффициент шероховатости $Z_R = 1{,}0$ (шлифование) и коэффициент окружной скорости Z_v = 1,0, получаем $\sigma_{HP} = 23H_{HRC}Z_N Z_R Z_v / S_{H\min} \approx$ 1790 МПа. Это практически совпадает с пределом контактной выносливости по критерию глубинной контактной прочности. Однако если по критерию глубинной контактной прочности имеем напряжения разрушения, то по критерию поверхностной — допускаемые σ_{HP}, т. е. не вызывающие опасной контактной усталости материала.

Очевидно, в области ограниченной долговечности при $N \le (1\ldots2)10^7$ циклов лимитирующими являются преимущественно ГКР. Расчеты показали, что при качественном выполнении ХТО область с минимальным коэффициентом запаса прочности по критерию ГКР соответствует глубине слоя h = 0,8–0,9 b_H. Однако при относительно незначительном снижении твердости (несколько десятков единиц по Виккерсу) область ГКР распространяется на глубину до h = 1,3–1,5 b_H, где действующие эквивалентные напряжения по любым критериям существенно ниже. А так как развитие первичной трещины происходит в направлении менее энергоемкого интеркристаллитного разрушения, т. е. к поверхности, то указанные глубины также должны рассматриваться как потенциально опасные. На базе $N = 10^7$ циклов $\sigma_{H\lim}$ при цементации находится в пределах 1800–1700 МПа (рис. 3).

Заслуживает внимания факт снижения прочности образцов CC-60 по сравнению с CD-30 при повышенной на расчетных глубинах твердости слоя 820–835 HV у образцов CC-60 и 760–790 HV у образцов CD-30, хотя логично было бы ожидать противоположное.

Анализ прочностных характеристик диффузионного слоя. Общепризнано, что повышение твердости определяет и повышение контактной прочности стальных деталей. Для сталей с твердостью $H<$ 450–500 HB имеет место близкая к линейной зависимость предела прочности при растяжении $\sigma_{в+} \approx 0{,}34\, H_{HB}$ (предел прочности при сжатии $\sigma_{в-}$ для пластичных сталей не определяется), а условные пределы текучести $\sigma_{0,2+}$ и $\sigma_{0,2-}$ принимаются равными. Однако дальнейшее повышение твердости ведет к нарушению этих соотношений — отчетливо проявляются различия в пределах прочности при растяжении и сжатии: $\sigma_{в-} > \sigma_{в+}, \sigma_{0,2+} \to \sigma_{в+}, \sigma_{0,2-} << \sigma_{в-}$.

Разрушение будет хрупким или смешанным в зависимости от жесткости нагружения. Роль сдвиговых напряжений в процессе разрушения с ростом хрупкости материала снижается, что наблюдается у подшипниковых и инструментальных сталей после закалки, а твердость уже не является достаточным показателем прочности материала. Так, были испытаны нешлифованные передачи трактора ДТ-75 [11] с межцентровым расстоянием a_w = 276,25 мм, модулем m = 6,5 мм, числами зубьев z_1 = 13, z_2 = 65. При расчетных напряжениях σ_H = 1750 МПа, числе оборотов

шестерни n_1 = 220 мин$^{-1}$ цементованные передачи выходили из строя после 200 часов по причине ГКР, распространяющихся на глубину до 1,4 мм. Такие же передачи, но нитроцементованные на указанных глубинах даже при меньшей твердости выходили из строя по причине питтинга при наработке свыше 700 часов. Это связывают с повышенной (вследствие меньшего размера аустенитного зерна) пластичностью нитроцементованных слоев по сравнению с цементованными.

В общем случае прочность материала определяется его способностью сопротивляться как касательным, так и нормальным напряжениям. В условиях значительной структурной неоднородности диффузионного слоя наиболее эффективным оказалось использование критерия предельного состояния Писаренко — Лебедева для структурно неоднородного материала [10, 13]. Применительно к контактным задачам действующие σ_e и допускаемые σ_{HKPe} эквивалентные напряжения для ГКР определялись по формулам:

$$\sigma_e = \chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 A^{1-(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/\sigma_1} \le \sigma_{HKPe}, \quad (1)$$

$$\sigma_{HKPe} = \chi(\chi - 0{,}11128) H_{HV} Z_{NK} K_1 K_2 K_3 K_4 K_5, \quad (2)$$

где $\chi = \sigma_{e+} / \sigma_{e-}$ — параметр пластичности материала, учитывающий степень участия сдвиговых деформаций в микроразрушении; σ_{e+}, σ_{e-} — напряжения отказа (разрушения) материала при одноосном растяжении и сжатии соответственно; A — параметр дефектности, для закаленных сталей A = 0,7–0,8; $Z_{NK} = (10^7 / N_{EK})^{1/m}$ — коэффициент долговечности; $K_1 - K_5$ — коэффициенты, учитывающие характер контактирования, количество потенциально опасных зон, влияние касательной нагрузки, качество материала и ХТО, разброс свойств материала в слое [10].

Повышение твердости определяет повышение контактной прочности стальных деталей. Но одновременно имеет место снижение пластических свойств материала с противоположной тенденцией. Следовательно, существует некоторое пороговое значение твердости стали, за которым дальнейшее ее повышение будет давать отрицательный эффект. Например, долговечность подшипников качения снижалась при повышении твердости свыше 64–65 $HRC_э$ [14]. Это особенно важно для оценки нагрузочной способности диффузионного слоя с его резкой структурной и, следовательно, прочностной неоднородностью.

В пределах упрочненного слоя происходит изменение структур от заэвтектоидных в приповерхностной зоне к доэвтектоидным — в переходной. В соответствии с этим свойства упрочненного слоя принимались аналогичными свойствам закаленных сталей близкого химсостава: высокоуглеродистых для эффективной зоны, среднеуглеродистых конструкционных — для переходной [15]. Сердцевина детали сохраняет свойства термоулучшенной стали. В рамках предложенной модели изменение этих свойств учитывается изменением параметра пластичности. Обработка доступных экспериментальных данных, сводка которых приведена в [10], позволила (естественно, в первом приближении) принять χ = 1 для термоулучшенных сталей и χ = 0,6–0,7 при H = 62–64 $HRC_э$ для качественных легированных инструментальных и подшипниковых сталей. При закалке конструкционных углеродистых сталей возможно снижение параметра χ до 0,45–0,55.

Влияние параметра χ на прочность весьма существенно. Так, для стали ШХ-15 при твердости 60–62 $HRC_э$ и χ = 0,6 в условиях плоской деформации глубина залегания максимальных эквивалентных напряжений по критерию Писаренко — Лебедева увеличилась на 15 % (по сравнению с критерием Мизеса). Зона повышенной относительной напряженности, выражаемой отношением текущего эквивалентного напряжения к максимальному $\sigma_e / \sigma_{e\max}$ > 0,95, распространилась вдоль центральной оси в интервале h = 0,75–1,15 b_H, а по критерию Мизеса — в интервале h = 0,50–0,95 b_H.

Повышение твердости в зоне повышенной относительной напряженности, например на глубине h = 1,0 b_H, с 750 HV до 825 HV (CD-30 и CC-60 [9]) привело не к росту нагрузочной способности, а к снижению приблизительно на 4 %, что вполне соответствует результатам экспериментов.

На графиках (рис. 4) приведены данные относительно изменения механических характеристик закаленной углеродистой стали ШХ-15.

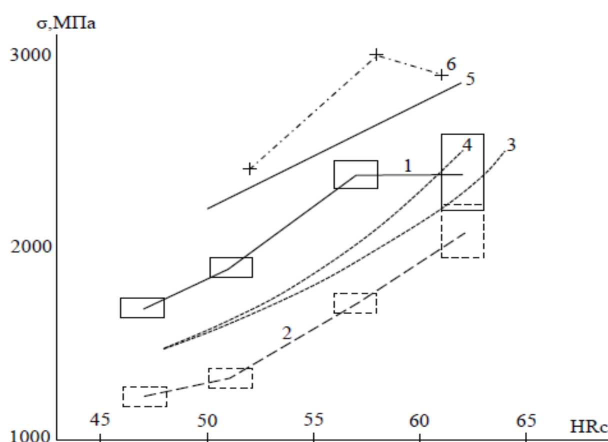


Рис. 4. Изменение механических свойств закаленной углеродистой стали ШХ-15 в зависимости от твердости: 1, 2 — $\sigma_{в+}$ и $\sigma_{0,5+}$ [16]; 3 — $\sigma_{H\lim}$ [17]; 4 — $\sigma_{0,5-}$ при остаточном аустените до 5 % [18]; 5 — $\sigma_{см}$ — допускаемые напряжения по смятию конструкционных сталей [1]; 6 — $\sigma_{в-}$ [10]

Fig. 4. Change in mechanical properties of hardened carbon steel ШХ-15 depending on hardness: 1, 2 — $\sigma_{в+}$ and $\sigma_{0,5+}$ [16]; 3 — $\sigma_{H\lim}$ [17]; 4 — $\sigma_{0,5-}$ with residual austenite up to 5% [18]; 5 — $\sigma_{см}$ — allowable stresses on collapse of structural steels [1]; 6 — $\sigma_{в-}$ [10]

Обращает на себя внимание снижение (или стабилизация) пределов прочности как на растяжение $\sigma_{в+}$, так и на сжатие $\sigma_{в-}$ при $H > 58$ $HRC_э$, что также усиливает сомнение в корректности экстраполяции на эти уровни рекомендованных [1] линейных зависимостей для $\sigma_{H\lim}$ и σ_{HP} .

Сопоставление применения процессов цементации и нитроцементации показывает, что нитроцементация обеспечивает более высокий уровень несущей способности. Различие в контактно-усталостной долговечности — 4 – 5 - кратное (и более) [11]. Однако в практике инженерных расчетов это никак не учитывается, оба процесса полагаются равноценными. Учет различия в пластических свойствах слоев позволил существенно уточнить расчеты. При твердости, одинаковой и постоянной по толщине образца (сталь 12Х2Н4А), $\sigma_{в+}$ образцов, подвергнутых нитроцементации, на 10–12 % выше, чем цементованных [19]. При отсутствии данных о соответствующем возрастании $\sigma_{в-}$ (рис. 4) это позволило в первом приближении принять на уровне твердости 850 H_{HV} значения параметра пластичности $\chi = 0{,}6$ (цементация сталей, не содержащих никель) и $\chi = 0{,}68$–$0{,}7$ (цементация никельсодержащих сталей и нитроцементация). С такими предпосылками при нитроцементации можно ожидать $\sigma_{H\lim b}$ в пределах 1850–2000 МПа (что, естественно, требует экспериментального подтверждения).

При отсутствии дополнительной информации изменение параметра пластичности в интервале 400–850 H_{HV} принималось линейным. По изложенной методике были проведены оценки контактной прочности рабочих поверхностей зубьев эвольвентных колес [8], результаты которых приведены на графиках рис. 5.

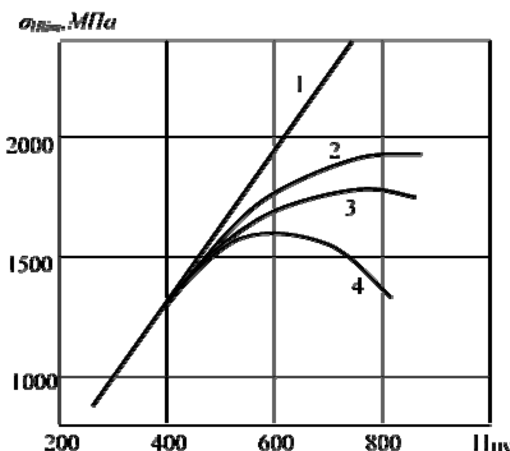


Рис. 5. Значения $\sigma_{H\lim}$ на базе 10^7 циклов при расчетном коэффициенте запаса — 1,0: по критерию Мизеса — график 1; по критерию Писаренко - Лебедева при нитроцементации, цементации и закалке среднеуглеродистых конструкционных сталей — графики 2, 3, 4 соответственно

Fig. 5. Values $\sigma_{H\lim}$ on the basis of 10^7 cycles at design safety factor — 1.0: according to Mises criterion — graph 1; to Pisarenko-Lebedev criterion under nitro-carburization, carburization and hardening of medium-carbon structural steels — graphs 2, 3, 4, respectively

С экспериментальными данными полученные результаты качественно согласуются, но в ряде случаев несколько превышают их. Так, предел поверхностной контактной прочности при нитроцементации определен на уровне 1900 МПа, что не было достигнуто ни в одном эксперименте.

Согласованная методика определения напряжения отказа при сжатии отсутствует. Например, по [20] для стали 40Х при твердости $45HRC_э$, $\sigma_{в-} = 3150$ МПа, тогда как по [21] для подшипниковой стали ШХ-15 при твердости $58HRC_э$ — $\sigma_{в-} = 2943$ Мпа. Вследствие этого значения параметра χ, полученные разными авторами, сильно разнятся. Зависимость параметра пластичности от твердости, принятая линейной, подлежит уточнению.

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать некоторые предварительные выводы.

1. Для цементуемых конструкционных сталей повышение твердости выше 650–700 HV практически не ведет к повышению контактно-усталостной долговечности, а при $H > 800$ HV можно ожидать даже ее снижение. При наличии никеля либо при нитроцементации пик долговечности смещается в область повышенной твердости.

2. В области ограниченной долговечности ($N \le 10^7$ циклов) опережающими являются глубинные контактные разрушения. Следовательно, и пределы контактно-усталостной долговечности $\sigma_{H\lim b}$ по показаниям поверхностного выкрашивания должны быть ориентированы на допускаемое нормальное контактное глубинное напряжение σ_{HKP}. При этом для $N \le 10^7$ коэффициент долговечности $Z_N = (10^7 / N)^{0,05}$ [5].

3. Следует считать $\sigma_{HKP} \approx \sigma_{H\lim b} = 1700–1800$ МПа ($N = 10^7$ циклов, цементация) при эффективной толщине слоя $h_{te} > 2,5b_H$, что определяет положение области с минимальными коэффициентами запаса по критерию ГКР в эффективной зоне, т. е. в зоне максимальной прочности. Разброс значений твердости в интервале 700–825 HV в потенциально опасной зоне на уровне прочности практически не сказался, т. к. эффект повышения прочности с увеличением твердости компенсируется снижением пластических свойств материала.

4. Влияние пластических свойств весьма существенно. Так, увеличение параметра пластичности с 0,6 до 0,67–0,7 при одном и том же уровне твердости определяет повышение $\sigma_{H\lim}$ на 120–150 МПа, что соответствует известному из практики различию прочности при цементации и нитроцементации.

5. Пределы контактной выносливости $\sigma_{H\lim}$ для цементации и нитроцементаци с последующей закалкой, в отличие от рекомендаций [1], целесообразно ограничить верхним пределом твердости поверхностей $62HRC_э$.

Библиографический список

1. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые, цилиндрические, эвольвентные. Расчет на прочность / Государственный комитет по стандартам. — Москва : Издательство стандартов, 1988. — 125 с.

2. British standard. Implementation of ISO 6336-1:1996. Calculation of load capacity of spur and helical gears / Technical Committee MCE/5, Gears. — London : BSI. — 92 p.

3. Зинченко, В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В. М. Зинченко. — Москва : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. — 303 с.

4. Effect of case dept of fatigue strength / A. Yoshida [et al.] // Bulletin of JSME. — 1986. — № 247. — P. 228–234.

5. Коновалов, Л. В. Особенности циклической прочности конструкционных сталей в области длительной долговечности / Л. В. Коновалов, И. М. Петрова // Вестник машиностроения. — 1998. — № 9. — С. 3–11.

6. Калашников, А. С. Современные методы обработки зубчатых колес / А. С. Калашников, Ю. А. Моргунов, П. А. Калашников. — Москва : Спектр, 2012. — 238 с.

7. Короткин, В. И. К оценке глубинной контактной выносливости эвольвентных зубчатых передач с поверхностно упрочненными зубьями / В. И. Короткин, Н. П. Онишков, А. В. Гольцев // Вестник машиностроения. — 2008. — № 5. — С. 9–14.

8. Онишков, Н. П. Об учете фактора твердости в контактных расчетах деталей машин / Н. П. Онишков, В. И. Короткин, К. В. Гузнов // Вестник НТУ «ХПИ». — 2008. — № 28. — С. 76–84.

9. Фудзита, К. Влияние глубины цементованного слоя и относительного радиуса кривизны на долговечность при контактной усталости цементованного ролика из хромомолибденовой стали / К. Фудзита, А. Иосида // Конструирование и технология машиностроения. —1981. — № 2. — С. 115–124.

10. Короткин, В. И. Зубчатые передачи Новикова. Достижения и развитие / В. И. Короткин, Н. П. Онишков, Ю. Д. Харитонов. — Москва : Машиностроение-1, 2007. — 384 с.

11. Сопротивление контактной усталости тяжелонагруженных зубчатых колес из стали 20ХН3А, упрочняемых ХТО / В. И. Шапочкин [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1987. — № 5. — С. 12–15.

12. Зубарев, Н. И. Оптимизация качественных параметров зацепления зубчатой передачи / Н. И. Зубарев, М. П. Игдалов // Тракторы и сельхозмашины. — 1989. — № 2. — С. 41–69.

13. Писаренко, Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. — Киев : Наукова думка, 1976. — 415 с.

14. Обеспечение на стадии производства заданной долговечности групп роликовых подшипников в зависимости от твердости их деталей / В. Е. Касьянов [и др.] // Вестник машиностроения. — 2000. — № 8. — С. 15–18.

15. Онишков, Н. П. Местное напряженное состояние и оценка глубинной контактной прочности поверхностно-упрочненных зубчатых передач Новикова : дис. … канд. техн. наук / Н. П. Онишков. — Харьков, 1991. — 164 с.

16. Сталь ШХ-15 [Электронный ресурс] / Центральный металлический портал РФ. — Режим доступа: metallicheckiyportal.ru/marki_metallov/stk/SHX15 (дата обращения: 14.08.17).

17. Сахонько, И. М. Контактная выносливость закаленной стали в зависимости от геометрических параметров соприкасающихся тел / И. М. Сахонько // Контактная прочность машиностроительных материалов. — Москва : Наука, 1964. — С. 52–59.

18. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. — Москва : Машиностроение, 1983. — 525 с.

19. Котов, О. К. Поверхностное упрочнение деталей машин химико-термическими методами. — Москва : Машиностроение, 1969. — 344 с.

20. Расчеты на прочность в машиностроении. [Том] I / С. Д. Пономарев [и др.]. — Москва : Машгиз, 1956. — 884 с.

21. Орлов, А. В. Испытания конструкционных материалов на контактную усталость / А. В. Орлов, О. Н. Черменский, В. М. Нестеров. — Москва : Машиностроение, 1980. — 110 с.

References

1. GOST 21354-87. Peredachi zubchatye, tsilindricheskie, evol'ventnye. Raschet na prochnost'. Gosudarstvennyy komitet po standartam. [GOST 21354-87. Cylindrical evolvent gears of external engagement. Strength calculation.] Moscow: Standartinform, 1988, 125 p. (in Russian).

2. British standard. Implementation of ISO 6336-1:1996. Calculation of load capacity of spur and helical gears. Technical Committee MCE/5, Gears. London: BSI, 92 p.

3. Zinchenko, V.M. Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoy obrabotki. [Gear surface engineering by thermal-chemical treatment methods.] Moscow: Bauman University Publ. House, 2002, 303 p. (in Russian).

4. Yoshida, A., et al. Effect of case dept of fatigue strength. Bulletin of JSME, 1986, no. 247, pp. 228–234.

5. Konovalov, L.V., Petrova, I.M. Osobennosti tsiklicheskoy prochnosti konstruktsionnykh staley v oblasti dlitel'noy dolgovechnosti. [Features of cyclic strength of structural steels in long life area.] Vestnik Mashinostroeniya, 1998, no. 9, pp. 3–11 (in Russian).

6. Kalashnikov, A.S., Morgunov, Y.A., Kalashnikov, P.A. Sovremennye metody obrabotki zubchatykh koles. [Modern methods of processing gears.] Moscow: Spektr, 2012, 238 p. (in Russian).

7. Korotkin, V.I., Onishkov, N.P., Goltsev, A.V. K otsenke glubinnoy kontaktnoy vynoslivosti evol'ventnykh zubchatykh peredach s poverkhnostno uprochnennymi zub'yami. [To assessment of deep contact resistance of involute gears with surface-hardened teeth.] Vestnik Mashinostroeniya, 2008, no. 5, pp. 9–14 (in Russian).

8. Onishkov, N.P., Korotkin, V.I., Guznov, K.V. Ob uchete faktora tverdosti v kontaktnykh raschetakh detaley mashin. [On considering hardness factor in contact analysis of machine parts.] Vestnik NTU "KPI", 2008, no. 28, pp. 76–84 (in Russian).

9. Fujita, K., Yoshida, A. Vliyanie glubiny tsementovannogo sloya i otnositel'nogo radiusa krivizny na dolgovechnost' pri kontaktnoy ustalosti tsemento-vannogo rolika iz khromomolibdenovoy stali. [Effect of carburized layer depth and relative curvature on life time under contact fatigue of carburized roller from chrome-molybdenum steel.] Journal of Engineering for Industry, 1981, no. 2, pp. 115–124 (in Russian).

10. Korotkin, V.I., Onishkov, N.P., Kharitonov, Y.D. Zubchatye peredachi Novikova. Dostizheniya i razvitie. [Novikov gearing. Achievements and development.] Moscow: Mashinostroenie -1, 2007, 384 p. (in Russian).

11. Shapochkin, V.I., et al. Soprotivlenie kontaktnoy ustalosti tyazhelonagruzhennykh zubchatykh koles iz stali 20KhN3A, uprochnyaemykh KhTO. [Fatigue strength of heavy-loaded gears of 20XH3A steel hardened by TCT.] Metal Science and Heat Treatment, 1987, no. 5, pp. 12–15 (in Russian).

12. Zubarev, N.I., Igdalov, M.P. Optimizatsiya kachestvennykh parametrov zatsepleniya zubchatoy peredachi. [Optimization of qualitative parameters of gearing.]/ Tractors and Agricultural Machinery, 1989, no. 2, pp. 41–69 (in Russian).

13. Pisarenko, G.S., Lebedev, A.A. Deformirovanie i prochnost' materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii. [Deformation and Strength of Materials in Complex Stress State.] Kiev: Naukova dumka, 1976, 415 p. (in Russian).

14. Kasyanov, V.V., et al. Obespechenie na stadii proizvodstva zadannoy dolgovechnosti grupp rolikovykh podshipnikov v zavisimosti ot tverdosti ikh detaley. [Support of the specified life for roller bearing groups depending on their parts hardness at the stage of production.] Vestnik Mashinostroeniya, 2000, no. 8, pp. 15–18 (in Russian).

15. Onishkov, N.P. Mestnoe napryazhennoe sostoyanie i otsenka glubinnoy kontaktnoy prochnosti poverkhnostno-uprochnennykh zubchatykh peredach Novikova : dis. … kand. tekhn. nauk. [Local stress state and estimation of the deep contact strength of surface-hardened Novikov gearing: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Kharkov, 1991, 164 p. (in Russian).

16. Stal' ShKh-15. [ShKh-15 steel.] Tsentral'nyy metallicheskiy portal RF. [RF Central metal portal.] Available at: metallicheckiyportal.ru/marki_metallov/stk/SHX15 (accessed: 14.08.17) (in Russian).

17. Sakhonko, I.M. Kontaktnaya vynoslivost' zakalennoy stali v zavisimosti ot geometricheskikh parametrov soprikasayushchikhsya tel. [Back-to-back endurance of hardened steel depending on geometrics of contacting bodies.] Kontaktnaya prochnost' mashinostroitel'nykh materialov. [Contact strength of engineering materials.] Moscow: Nauka, 1964, pp. 52–59 (in Russian).

18. Geller, Y.A. Instrumental'nye stali. [Instrument steels.] Moscow: Mashinostroenie, 1983, 525 p. (in Russian).

19. Kotov, O.K. Poverkhnostnoe uprochnenie detaley mashin khimiko-termicheskimi metodami. [Surface hardening of machine parts by thermal-chemical methods.] Moscow: Mashinostroenie, 1969. — 344 с.

20. Ponomarev, S.D., et al. Raschety na prochnost' v mashinostroenii. Tom I. [Stress calculations in engineering.] Moscow: Mashgiz, 1956, 884 p. (in Russian).

21. Orlov, A.V., Chermenskiy, O.N., Nesterov, V.M. Ispytaniya konstruktsionnykh materialov na kontaktnuyu ustalost'. [Contact fatigue test of structural materials.] Moscow: Mashinostroenie, 1980, 110 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 19.05.2017
Сдана в редакцию 19.05.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 19.05.2017
Submitted 19.05.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Онишков Николай Петрович,
доцент кафедры «Автотранспортные, строительные и дорожные средства» Академии строительства и архитектуры Донского государственного технического университета (РФ, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1105-8342
onishkova1@yandex.ru

Onishkov, Nikolay P.,
associate professor of the Trucking, Construction and Road Facilities Department, Academy of Construction and Architecture, Don State Technical University (RF, 344006, Rostov-on-Don, ul. Sotsialisticheskaya, 162), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1105-8342
onishkova1@yandex.ru

Короткин Виктор Ильич,
ведущий научный сотрудник Института математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета (РФ, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4772-7181
korotkin@math.rsu.ru

Korotkin, Victor I.,
senior research scholar, Vorovich Institute for Mathematics, Mechanics, and Computer Science, Southern Federal University (RF, 344006, Rostov-on-Don,. Stachky pr, 200/1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4772-7181
korotkin@math.rsu.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9:531.3 10.23947/1992-5980-2017-17-3-14-26

Влияние производства тепла на динамику процесса резания*

В. Л. Заковоротный[1], И. А. Винокурова[2]**

[1, 2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Effect of heat generation on dynamics of cutting process***

V. L. Zakovorotny[1], I. A. Vinokurova[2]**

[1, 2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Один из механизмов, вызывающих потерю устойчивости равновесия в динамической системе резания, обусловлен зависимостью сил от скорости обработки. В свою очередь, зависимость сил от скорости объясняется изменением температуры, связанным с выделением энергии в зоне резания. Необратимые преобразования в зоне резания (и, следовательно, температура) не только влияют на физико-механические характеристики материала зоны резания, но и приводят к образованию различных диссипативных структур, формируемых в областях первичной пластической деформации и контакта передней поверхности инструмента со стружкой. При этом все изменения свойств зоны резания, зависящие от производства тепла и теплообмена, происходят во времени.

Материалы и методы. Приводится математическая модель системы, рассматривается проблема влияния термодинамической подсистемы на устойчивость траекторий формообразующих движений и на притягивающие множества, формируемые в окрестности этих траекторий. Также приводятся примеры влияния термодинамической подсистемы на динамику системы резания в целом.

Результаты исследования. Во всех известных работах динамическая система резания рассматривалась как механическая подсистема, координаты состояния которой никак не зависели от координат термодинамической подсистемы. В отличие от этих работ в статье приводятся результаты изучения взаимосвязанных термодинамической и механической подсистем. Главное внимание уделяется свойствам динамической системы резания. Рассмотрено изменение этих свойств в зависимости от переходных процессов в механической и термодинамической подсистемах. Показана их взаимосвязь через изменение параметров, зависящих от температуры. Принимается во внимание изменение давления стружки на переднюю поверхность инструмента, обусловленное необратимыми преобразованиями энергии в зоне резания. Учитываются также температурные деформации инструмента. Таким образом, рассматривается взаимное влияние механической и термодинамической подсистем.

Introduction. One of the mechanisms causing the loss of balance stability in the dynamic cutting system is specified by the forces-processing speed relation. Again, the forces-speed relation is explained by the temperature variation associated with the release of energy in the cutting zone. Irreversible transformations in the cutting area (and, consequently, the temperature) not only affect the stress-strain behavior of the cutting zone material, but results in the formation of various dissipative structures in the primary plastic flow areas, and the tool face-turnings contact. In this case, all changes in the cutting area properties depending on the heat generation and transfer occur in the course of time.

Materials and Methods. A system mathematical model is given; the problem of the thermodynamic subsystem effect on the forming movement trajectories stability and on the attracting sets made up in the neighborhood of these trajectories is considered. And examples of the thermodynamic subsystem effect on the cutting system dynamics in general are given.

Research Results. In all well-known papers, the dynamic cutting system is examined as a mechanical subsystem which coordinates of state in no way depend on the coordinates of the thermodynamics subsystem. In contrast to the known studies, the results of investigating interconnected thermodynamic and mechanical subsystems are given here. The primary focus is on the dynamic cutting system properties. The change in these properties is considered depending on the transient processes in the mechanical and thermodynamic subsystems. Their interrelation is shown through the change in parameters depending on temperature. The variation of chipping pressure on the tool face caused by irreversible energy transformations in the cutting area is taken into account. Besides,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания 9.77-22.2017/БЧ: «Разработка теории синергетического управления процессом резания с учетом влияния термодинамики».

** E-mail: vzakovorotny@dstu.edu.ru, irina_24032011@mail.ru

*** The research is done within the frame of Government task no. 9.77-22.2017/БЧ: “Development of the synergetic control theory of the cutting process with account of thermodynamics effect”.

Обсуждение и заключения. Необратимые преобразования, подводимые к зоне резанья могут существенно влиять на такие свойства процесса обработки как устойчивость точки равновесия, а также на формируемые в ее окрестности различные притягивающие множества.. При этом точка равновесия динамической системы резанья рассматривается в подвижной системе координат движения, которой определяется управляемыми траекториями исполнительных элементов станка. Как точка равновесия, так и притягивающие множества характеризуют упругие деформационные смещения вершины режущего инструмента относительно обрабатываемой детали в точке контакта с ней инструмента. Поэтому при потере устойчивости, формируемые притягивающие множества непосредственно влияют на параметр качества изготовляемой детали. Учет термодинамических процессов позволяет не только повысить достоверность изучения динамической системы резанья, но и открыть новые не рассматриваемые ранее, направления стабилизации процесса обработки.

temperature tool deformations are considered. Thus, interference of the mechanical and thermodynamic subsystems is examined.

Discussion and Conclusions. Irreversible transformations applied to the cutting area can significantly affect the processing properties, such as balance point stability, as well as various attracting sets formed in its vicinity. Here, the balance point of the dynamic cutting system is considered in the moving coordinates which are determined by the controlled trajectories of the machine executive elements. Both the balance point and the attracting sets characterize elastic deformation shifts of the cutting tip against the workpiece in its contact point with the tool. Therefore, under instability, the formed attracting sets directly affect the workpiece quality parameter. Considering thermodynamic processes allows not only to increase validity of studying the dynamic system of cutting, but also to develop new approaches to the treatment process control.

Ключевые слова: процесс точения, устойчивость, притягивающие множества, термодинамическая и механическая подсистемы.

Keywords: turning process, stability, attracting sets, thermodynamic and mechanical subsystems.

Образец для цитирования: Заковоротный, В. Л. Влияние производства тепла на динамику процесса резания / В. Л. Заковоротный, И. А. Винокурова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 14–26.

For citation: V.L. Zakovorotny, I.A. Vinokurova.· Effect of heat generation on dynamics of cutting process. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 14–26.

Введение. Проблемы динамики процесса резания являлись предметом многочисленных исследований [1–10]. Изучению подлежала механическая система, состоящая из взаимодействующих через процесс обработки подсистем инструмента и обрабатываемой детали. Свойства процесса резания обусловлены его динамической связью, которая определяет модель сил в координатах состояния [11, 12]. Описаны основные механизмы потери устойчивости равновесия в системе. Их действие объясняется запаздыванием вариаций сил по отношению к деформационным смещениям [2–4], а также особенностями зависимости сил от скорости резания [11–14]. Анализировалось также влияние на устойчивость следа от инструмента на обработанной части детали на предыдущем обороте [15]. Показано, что при рассмотрении линеаризованного уравнения в вариациях относительно равновесия системы оба этих механизма имеют одну природу [4–6]. Зависимость же сил от скорости, как и существование запаздывания, во многом объясняется изменениями температуры в зоне резания. С изменениями температуры связывают вариации физико-механических свойств материала в зоне резания и формирование диссипативных структур — например, нароста или застойной зоны.

Постановка проблемы. Во всех известных работах переходные процессы в термодинамической системе не представлены. В статье, в отличие от ранее выполненных исследований, рассматривается система резания, состоящая из двух взаимосвязанных динамических подсистем: механической и термодинамической. Эта взаимосвязь изменяет динамические свойства системы.

Обоснование математической модели. При изучении физических систем возможны различные уровни представлений: микро-, мезо- и макроуровни. Здесь ограничимся моделированием на макроуровне, согласно которому механическую и термодинамическую подсистемы представим конечномерными динамическими структурами. Будем рассматривать на макроуровне две подсистемы: механическую и термодинамическую. Для моделирования механической подсистемы воспользуемся гипотезами, проанализированными ранее [11–14]. Рассмотрим продольное точение инструментом, имеющим главный угол в плане $\varphi = \pi / 2$ (рис. 1).

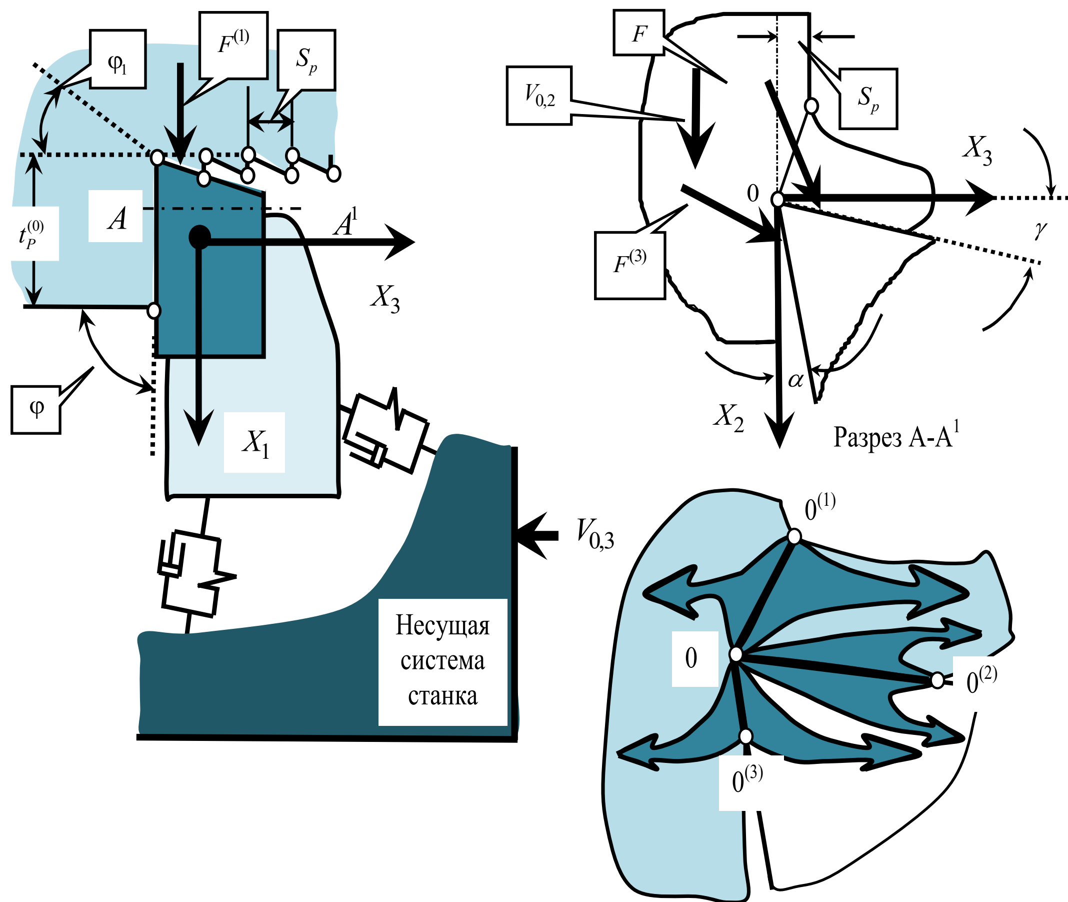


Рис. 1. Ориентация осей деформационных смещений и сил, действующих на режущий инструмент и обрабатываемую деталь

Fig. 1. Positioning of deformation displacement axes and forces affecting cutting tool and workpiece

Начало координат рассматривается в точке контакта вершины инструмента с обрабатываемой деталью в предположении, что упругие деформации отсутствуют. Будем рассматривать только деформации инструмента $X = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \Re^3$. Тогда при силах резания $F_\Sigma(t)$ деформации вершины инструмента определяются

$$m\frac{d^2X}{dt^2} + h\frac{dX}{dt} + cX = F_\Sigma(t), \tag{1}$$

где $m = \lfloor m_{s,k} \rfloor, m_{s,k} = m, при: s = k,\; m_{s,k} = 0, при: s \neq k,\quad s,k = 1,2,3$ в кгс²/мм, $h = \lfloor h_{s,k} \rfloor, s,k = 1,2,3$ в кгс/мм, $c = \lfloor c_{s,k} \rfloor, s,k = 1,2,3$ в кгс/мм — симметричные и положительно определенные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов; $F_\Sigma(t) = F(t) + F^{(1)}(t) + F^{(3)}(t)$; $F(t) = F_0\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$ — силы, действующие на переднюю поверхность инструмента; $F^{(1)}(t) = F_0^{(1)}(t)\{1,0,0\}^T$, $F^{(3)}(t) = F_0^{(3)}(t)\{0,0,1\}^T$ — силы, действующие на задние грани инструмента, и ограничивающие развитие периодических движений инструмента относительно детали (рис. 1).

Будем пользоваться синергетической концепцией анализа [14, 16], согласно которой необходимо силы F_Σ представить в координатах состояния. Кроме сил, формируемых в области передней грани F, учтем силы, действующие на задние грани $F^{(1)}$ и $F^{(3)}$ (рис. 1). Параметры подсистем определяются по правилам, изложенным, например, в [17, 18].

Для определения F_0 принята гипотеза [11–14]: силы пропорциональны площади срезаемого слоя. При моделировании взаимосвязи механической и термодинамической подсистем учтем: коэффициент $\rho_0(\Xi)$, имеющий смысл давления стружки на переднюю поверхность инструмента, зависит от температуры Ξ; в инструменте имеются температурные деформации $X_{1,\theta}$, которые рассматриваются только в направлении X_1. Тогда

$$F_0(t) = \rho_0(\Xi)\{t_P^{(0)} + X_{1,\theta}(t) - X_1(t)\}\{\int_{t-T}^{t}[V_{3,0} - v_3(\xi)]d\xi\}, \tag{2}$$

где $t_P^{(0)}$ — величина припуска (в [мм]) без учета упругих и тепловых деформаций; $V_{3,0}$ — скорость продольной подачи; $v_3(\xi)$ — скорость упругих деформаций в направлении подачи; $X_{1,\theta}(t) = k_\theta^{(X)}\Xi$ — температурная деформация инструмента, отличающаяся от температуры на коэффициент $k_\theta^{(X)}$; T — время оборота.

Силы $F^{(1)}$ и $F^{(3)}$ зависят от сближения задних граней инструмента с деталью и быстро возрастают по мере сближения, зависящего от кинематических значений задних углов. Их можно считать зависящими только от скоростей по направлениям X_1 и X_3, так как $\varphi = \pi/2$ и $\varphi_1 \Rightarrow 0$. Поэтому

$$F_0^{(3)}(t) = F_{3,0}\exp\alpha_2[V_{0,3} - dX_3/dt]; \; F_0^{(1)}(t) = F_{1,0}\exp\alpha_3[dX_{1,\theta}/dt - dX_1/dt], \qquad (3)$$

где $F_{1,0}$ и $F_{3,0}$ — модули сил в области контакта при нулевой скорости упругих и тепловых деформаций; α_2 и α_3 — параметры, характеризующие крутизну увеличения сил в зависимости от скоростей в [с/мм].

Тогда уравнение динамики определяется (1)–(3).

При описании термодинамической подсистемы представим режущий инструмент как однопараметрический объект с сосредоточенной емкостью, в котором имеется источник производства тепла и описан механизм его отбора [19, 20]:

$$c_\theta M_\theta \frac{d\Xi}{dt} = Q_{вх} - Q_{вых}, \qquad (4)$$

где c_θ — удельная теплоемкость в [Дж/^{0}С·кг]; M_θ — приведенная масса зоны резания в [кг]; $Q_{вх}$, $Q_{вых}$ — скорости производства и стока тепла в [Дж/с].

Известно [17–19], что производство тепла при резании определяется мощностью необратимых преобразований в областях первичной пластической деформации ($0–0^{(1)}$), контакта передней поверхности инструмента со стружкой ($0–0^{(2)}$) и задней грани с заготовкой ($0–0^{(3)}$). На рис. 1 стрелками показаны главные направления стоков тепла из зоны резания. В области ($0–0^{(1)}$) формируется количество тепла, эквивалентное энергии, затраченной на деформирование и разрушение при стружкообразовании и формировании поверхностного слоя. В области ($0–0^{(2)}$) производится тепло, эквивалентное работе сил трения при контакте передней поверхности режущего клина и деформированного материала. В области ($0–0^{(3)}$) формируется тепло, эквивалентное работе сил трения на задней поверхности инструмента. Если выделить основные источники производства тепла, то можно ограничиться областями $0–0^{(1)}$ и $0–0^{(2)}$, а сток тепла обобщить его зависимостью от эквивалентной площади срезаемого слоя. Принимая во внимание закон Фурье для стационарного состояния в дискретной форме, можно полагать, что сток тепла в единицу времени зависит от площади срезаемого слоя, градиента температуры по направлению теплообмена и коэффициента теплопроводности. Таким образом, упрощенное уравнение термодинамической системы для однопараметрического объекта с сосредоточенной емкостью, интерпретируемой как зона резания без раскрытия ее внутренней структуры, можно представить в виде

$$c_\theta M_\theta \frac{d\Xi}{dt} = c_M(N_1 + N_2) - \lambda\frac{\Delta\theta}{\Delta X}S, \qquad (5)$$

где N_1, N_2 — мощности необратимых преобразований в зонах стружкообразования и контакта передней грани инструмента со стружкой; c_M — механический эквивалент тепла, следовательно, производство тепла в единицу времени выражается в [Дж/с]; λ — коэффициент теплопроводности [Дж/м·^{0}С]; $\frac{\Delta\theta}{\Delta X}$ — градиент температуры в дискретной форме; S — площадь срезаемого слоя.

Если при заданных технологических режимах пренебречь вариациями площади среза, параметрами процесса резания и рассматривать приращение температуры к температуре окружающей среды, равной нулю, то уравнение (5) можно представить:

$$T_\theta \frac{d\Xi}{dt} = k_\theta(N_1 + N_2) - \Xi, \qquad (6)$$

где T_θ, — постоянная времени термодинамической подсистемы в [с], экспериментально определяемая по переходным процессам изменения температуры; k_θ — экспериментально определяемый коэффициент связи установившейся температуры с мощностью необратимых преобразований.

С учетом отмеченных выше допущений (6) является уравнением термодинамической подсистемы с постоянными параметрами. Следовательно, уравнение термодинамической подсистемы, в котором раскрыты источники про-

изводства тепла, усредненные условия теплообмена и изменение суммарной температуры в зоне резания без ее распределения в зонах резания и инструменте:

$$T_{\theta} d\Xi / dt = k_{\theta}\rho_0(\Xi)\{\chi_2(V_{2,0} - dX_2/dt) + \chi_3[(\phi)^{-1}V_{2,0} + V_{3,0} - dX_3/dt]\}\times \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow [t_P^{(0)} + X_{1,\theta}(t) - X_1(t)]\{\int_{t-T}^{t}[V_{3,0} - v_3(\xi)]d\xi\} - \Xi \,, \quad (7)$$

где $V_{2,0}$ — заданная скорость резания; ϕ — коэффициент усадки стружки.

В (7) не учитывается работа сил в области контактов задних граней инструмента, так как она на порядок меньше работы в области первичной пластической деформации и контакта передней грани со стружкой.

Для связи механической и термодинамической подсистем необходимо раскрыть зависимость $\rho_0(\Xi)$. Изучение взаимосвязи сил и температуры при различных скоростях резания (и, следовательно, мощности необратимых преобразований) позволяет экспериментально определить $\rho_0(\Xi)$. Главная особенность в скоростном диапазоне 0,2–2,0 м/с в том, что при увеличении производства тепла монотонно уменьшаются все составляющие сил резания, следовательно $\rho_0(\Xi)$. Для аппроксимации $\rho_0(\Xi)$ удобно воспользоваться зависимостью, основанной на известных экспериментальных данных [11, 12, 14, 21]:

$$\rho_0(\Xi) = \rho_{0,0}\{1 + \mu\exp(-\alpha_{\theta}\Xi)\}\,, \quad (8)$$

где $\rho_{0,0}$ — давление стружки с учетом температуры окружающей среды; μ — безразмерный коэффициент, определяющий изменение давления в области малых и высоких температур; α_{θ} — параметр в $[(^0C)^{-1}]$, определяющий крутизну изменения давления при увеличении температуры.

Таким образом, динамика системы в целом определяется системами (1), (2), (3) и (7), которые взаимосвязаны между собой, то есть в дискретной форме (на макроуровне) раскрывают особенности теплового и механического взаимодействий в системе резания.

Свойство равновесия. Рассмотрим равновесие в подвижной системе координат, движение которой определяется постоянными скоростями исполнительных элементов. При этом учтем, что в равновесии X_1^*, X_2^*, X_3^* и Ξ^* выполняются условия: $X_1^* = \text{const}, X_2^* = \text{const}, X_3^* = \text{const}$, $X_3^*(t) = X_3^*(t-T)$ и $\Xi^* = \text{const}$. Следовательно, производство тепла равно его оттоку в единицу времени. Тогда

$$\begin{cases} c_{1,1}X_1^* + c_{2,1}X_2^* + c_{3,1}X_3^* = \chi_1\rho_{0,0}S_P^{(0)}[1 + \mu\exp(-\alpha_{\theta}\Xi^*)]t_{P,\Sigma} + F_{1,0}; \\ c_{1,2}X_1^* + c_{2,2}X_2^* + c_{3,2}X_3^* = \chi_2\rho_{0,0}S_P^{(0)}[1 + \mu\exp(-\alpha_{\theta}\Xi^*)]t_{P,\Sigma}; \\ c_{1,3}X_1^* + c_{2,3}X_2^* + c_{3,3}X_3^* = \chi_3\rho_{0,0}S_P^{(0)}[1 + \mu\exp(-\alpha_{\theta}\Xi^*)]t_{P,\Sigma} + F_{3,0}\exp(\alpha_2 V_{0,3}); \\ \Xi^* = k_{\theta}\rho_{0,0}S_P^{(0)}V_{\theta}t_{P,\Sigma}[1 + \mu\exp(-\alpha_{\theta}\Xi^*)], \end{cases} \quad (9)$$

где $V_{\theta} = \{\chi_2 V_{2,0} + \chi_3[(\phi)^{-1}V_{2,0} + V_{3,0}]\}$ — эффективная скорость; $t_{P,\Sigma} = t_P^{(0)} + k_{\theta}^{(X)}\Xi^* - X_1^*$ — установившееся значение припуска в точке равновесия.

Система (9) в диапазоне реального изменения параметров имеет единственное решение, так как всегда выполняется условие $t_P^{(0)} \rangle (X_1^* - k_{\theta}^{(X)}\Xi^*)$.

Для определения устойчивости X_1^*, X_2^*, X_3^*, Ξ^* необходимо рассмотреть линеаризованное уравнение в вариациях относительно точки равновесия [18]. Тогда после замены $X_1(t) = X_1^* + x_1(t)$, $X_2(t) = X_2^* + x_2(t)$, $X_3(t) = X_3^* + x_3(t)$, $\Xi(t) = \Xi^* + \theta(t)$ получаем линеаризованное уравнение в вариациях:

$$M\frac{d^2x}{dt^2} + H\frac{dx}{dt} + Cx = 0\,, \quad (10)$$

где $M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $H = \begin{bmatrix} h_{1,1} + F_{0,1}\alpha_1 & h_{2,1} & h_{3,1} & 0 \\ h_{1,2} & h_{2,2} & h_{3,2} & 0 \\ h_{1,3} & h_{2,3} & h_{3,3} & 0 \\ 0 & k_\theta h_{x_2} & -k_\theta h_{x_3} & T_\theta \end{bmatrix}$; $C = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} k_\theta^{(x)} \\ c_{1,2} + \chi_2\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} k_\theta^{(x)} \\ c_{1,3} + \chi_3\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3\chi_\theta\rho_0 S_P^{(0)} k_\theta^{(x)} \\ k_\theta c_{x_1} & 0 & k_\theta c_{x_3} & (1 - k_\theta c_\theta) \end{bmatrix}$;

$x = \{x_1, x_2, x_3, \theta\}^T$; $\chi_\theta = [1 + \mu \exp(-\alpha_\theta \Xi^*)]$; $c_\theta = \rho_0 S_P^{(0)} V_\theta [\chi_\theta k_\theta^{(x)} - t_{P,\Sigma}\alpha_\theta \exp(-\alpha_\theta \Xi^*)]$ — параметр мощности необратимых преобразований в $\left[\frac{\text{кг} \cdot \text{мм}}{{}^0\text{C} \cdot \text{с}}\right]$; k_θ — параметр связи мощности необратимых преобразований с производством температуры в $\left[\frac{{}^0\text{C} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{мм}}\right]$; $c_{x_1} = \rho_0 \chi_\theta S_P^{(0)} V_\theta$ и $c_{x_2} = \rho_0 \chi_\theta t_{P,\Sigma} V_\theta$ — коэффициенты в $\left[\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right]$; $h_{x_2} = \rho_0 \chi_\theta t_{P,\Sigma} S_P^{(0)} (\chi_2 + \phi^{-1}\chi_3)$ и $h_{x_3} = \rho_0 \chi_\theta t_{P,\Sigma} S_P^{(0)} \chi_3$ — коэффициенты в [кг].

Таким образом, на устойчивость равновесия кроме параметров механической подсистемы оказывают влияние параметры термодинамической подсистемы и коэффициенты связи между ними. Рассмотрим пример влияния параметров термодинамической подсистемы на устойчивость равновесия. Параметры механической подсистемы: $m = 0{,}8 \cdot 10^3$, кг$\cdot$ с^2/мм ; элементы матриц h и c приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Параметры механической подсистемы: $m = 0{,}8 \cdot 10^3$, кг$\cdot$ с^2/мм ; элементы матриц h и с

Mechanical subsystem parameters: $m = 0.8 \cdot 10^3$, кг$\cdot$ с^2 / мм *; array elements h and* c

$h_{1,1}$, кг$\cdot$ c / мм	$h_{2,2}$, кг$\cdot$ с/мм	$h_{3,3}$, кг$\cdot$ с/мм	$h_{1,2} = h_{2,1}$, кг$\cdot$ с/мм	$h_{1,3} = h_{3,1}$, кг$\cdot$ с/мм	$h_{2,3} = h_{3,2}$, кг$\cdot$ с/мм
0,25	0,15	0,15	0,1	0,08	0,08
$c_{1,1}$, кг/мм	$c_{2,2}$, кг/мм	$c_{3,3}$, кг/мм	$c_{1,2} = c_{2,1}$, кг/мм	$c_{1,3} = c_{3,1}$, кг/мм	$c_{2,3} = c_{3,2}$, кг/мм
1000	800	400–5000	200	100	100

Параметры динамической связи процесса резания и термодинамической подсистемы соответственно приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2
Table 2

Параметры динамической связи процесса резания
Dynamic linking parameters of cutting process

ρ_0, кг/мм^2	α_1, с/м/	α_2, с/м/	$F_{0,1}$, / кг	$F_{0,3}$, / кг
(100-700)	(0,2-0,5)	(0,2-0,5)	0,5	0,5

Таблица 3
Table 3

Параметры термодинамической подсистемы
Thermodynamic subsystem parameters

k_θ, ^{0}C$\cdot$ с/кг$\cdot$ мм	μ	ϕ	$k^{(x)}{}_\theta$, мм/^{0}C$\cdot$	T_θ, с$\cdot$	α_θ, $(^0\text{C})^{-1}$
6·10^{-3}	0,5	1,5	(1-2)10^{-3}	(0,01-0,1)	(0,001-0,05)

Будем анализировать влияние на механическую систему термодинамической подсистемы при постоянных технологических режимах. В приведенных таблицах указаны диапазоны изменения некоторых параметров, рассматриваемых с точки зрения их влияния на устойчивость. Вначале проанализируем свойство равновесия, то есть зависимость X_1^*, X_2^*, X_3^* и Ξ^* от технологических режимов V_θ, $S_P^{(0)}$, $t_{P,\Sigma}$. На рис. 2 приведен пример изменения координат X_1^*, X_2^*, X_3^* и Ξ^* при врезании инструмента в заготовку.

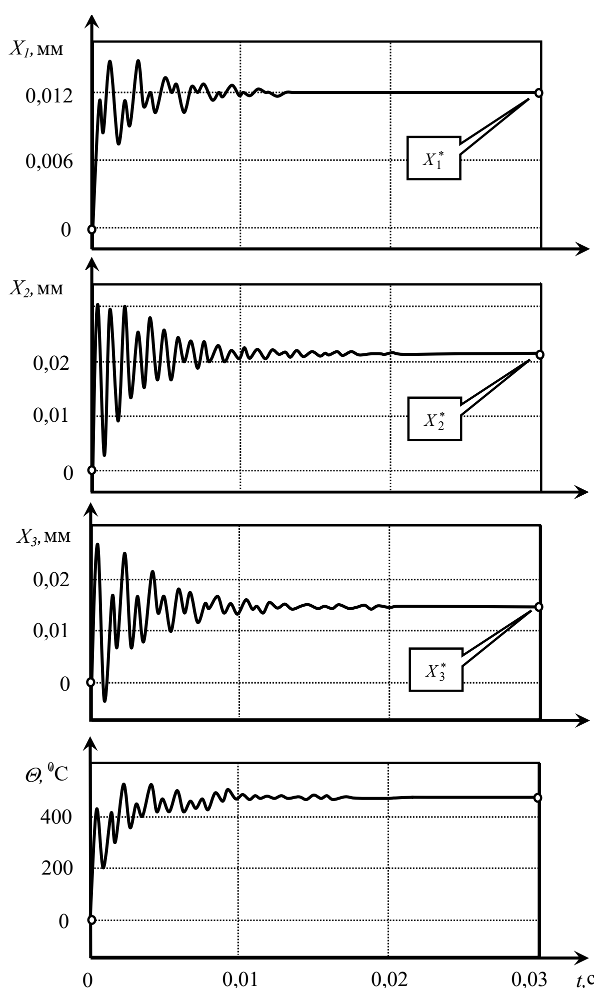
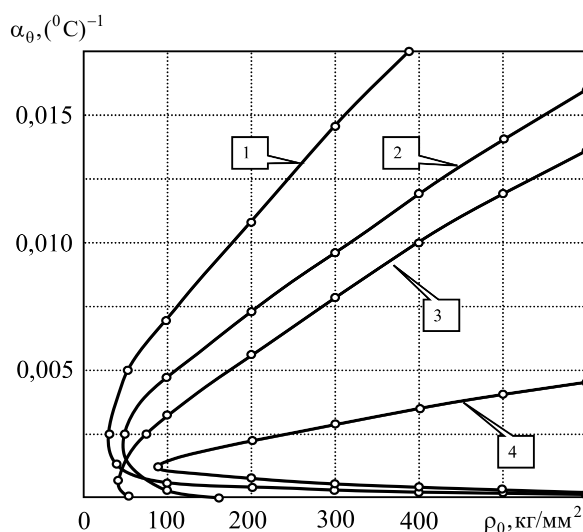


Рис. 2. Пример переходных процессов деформационных смещений и температуры при врезании инструмента

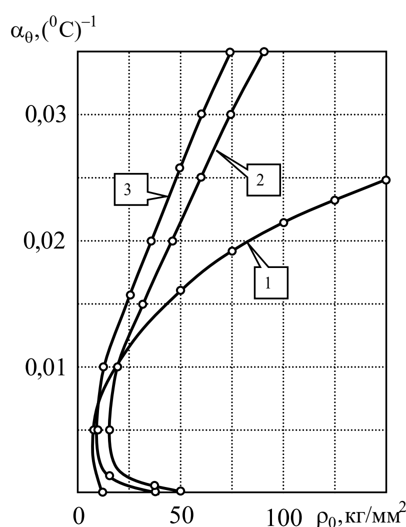
Fig. 2. Example of transient processes of deformation displacements and temperature under tool insertion

Здесь хорошо заметна взаимосвязь изменения температуры Ξ^* и деформационных смещений (X_1^*, X_2^*, X_3^*), свидетельствующая о единстве процессов в механической и термодинамической подсистемах. Не останавливаясь на деталях, отметим главные особенности влияния технологических режимов на температуру. Во-первых, по мере увеличения скорости резания температура возрастает монотонно, но не пропорционально. Это связано с тем, что за счет влияния температуры параметр $\rho_0(\Xi)$ в установившемся состоянии по мере увеличения скорости уменьшается. Это влияние так называемого температурно-скоростного фактора. Во-вторых, вариации величин подачи и припуска мало влияют на установившиеся значения температуры. В этом случае, например, при увеличении подачи одновременно возрастает эффективная площадь срезаемого слоя. Поэтому увеличивается и отток тепла. При анализе устойчивости будем рассматривать области устойчивости в параметрическом пространстве. Анализ показывает, что на устойчивость системы со стороны термодинамической подсистемы оказывают наиболее существенное влияние следующие параметры: T_θ, k_θ, α_θ, $k_\theta^{(X)}$. При этом области устойчивости зависят от матриц h, c в динамической подсистеме инструмента.

Во всех случаях при увеличении элементов матрицы h области устойчивости расширяются. Что касается матрицы c, то в ней наиболее существенное влияние на область устойчивости оказывает параметр $c_{3,3}$. На рис. 3 приведен пример изменения областей устойчивости в плоскости $\alpha_\theta - \rho_0$ для случая, когда $k_\theta^{(X)} = 0$.



a)



b)

Рис. 3. Области устойчивости в плоскости $\rho_0-\alpha_\theta$, : кривая 1 при $T_\theta=0{,}01$ с , $c_{3,3}=5000$ кг/ мм , кривая 2 при $T_\theta=0{,}05$ с , $c_{3,3}=5000$ кг/ мм , кривая 3 при $T_\theta=0{,}1$ с , $c_{3,3}=5000$ кг/ мм , кривая 4 при $T_\theta=0{,}4$ с , $c_{3,3}=5000$ кг/ мм (а); кривая 1 при $T_\theta=0{,}02$ с , $c_{3,3}=5000$ кг/ мм , кривая 2 при $T_\theta=0{,}02$ с , $c_{3,3}=1000$ кг/ мм , кривая 3 при $T_\theta=0{,}02$ с , $c_{3,3}=400$ кг/ мм (б)

Fig. 3. Stability areas in $\rho_0-\alpha_\theta$, *plane: curve 1 at* $T_\theta=0.01$ c , $c_{3,3}=5000$ kg/ mm , *curve 2 at* $T_\theta=0.05$ c $c_{3,3}=5000$ kg/ mm , *curve 3 at* $T_\theta=0.1$ c , $c_{3,3}=5000$ *kg / mm* , *curve 4 at* $T_\theta=0.4$ c , $c_{3,3}=5000$ kg/ mm *(a); curve 1 at* $T_\theta=0.02$ c , $c_{3,3}=5000$ kg/ mm , *curve 2 at* $T_\theta=0.02$ c , $c_{3,3}=1000$ kg/ mm , *curve 3 at* $T_\theta=0.02$ c , $c_{3,3}=400$ kg/ mm *(b)*

Что касается коэффициентов $k_\theta^{(X)}$, k_θ, то их увеличение во всех случаях приводит к расширению областей неустойчивости.

Приведем пример изменения области устойчивости в плоскости варьируемых параметров $\rho_0-k_\theta^{(X)}$ (рис. 4).

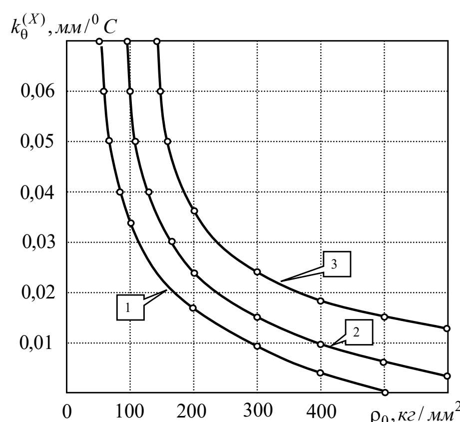


Рис. 4. Области устойчивости в плоскости $\rho_0 - k_{\theta}^{(X)}$: 1 — $T_{\theta} = 0{,}005$ с, 2 — $T_{\theta} = 0{,}02$ с, 3 — $T_{\theta} = 0{,}2$ с

Fig. 4. Stability areas in $\rho_0 - k_{\theta}^{(X)}$ *plane: 1 —* $T_{\theta} = 0.005$ с, *2 —* $T_{\theta} = 0.02$ с, *3 —* $T_{\theta} = 0.2$ с

Во всех случаях на рис. 3 и 4 система устойчива слева от приведенных линий. Мы видим, что для каждого значения параметра ρ_0, характеризующего среднее давление стружки на переднюю поверхность инструмента, существует предельное значение $k_{\theta}^{(X)}$, при котором система теряет устойчивость равновесия.

Анализ результатов. Если следовать синергетическому принципу анализа динамических систем, взаимодействующих через различные среды, то необходимо силы взаимодействия представить в координатах состояния. В данном случае это силы резания [14–16, 22]. Очевидно, что формирование сил резания нельзя объяснить только механической природой. На законы формирования сил резания не в меньшей степени влияют термодинамические процессы, а многие особенности динамических явлений при резании можно объяснить только на основе единства связанных подсистем: механической и термодинамической. Приведенный выше материал показывает, что такая категория динамики, как устойчивость равновесия, зависит не только от рассмотрения механических параметров (матриц инерционных, скоростных, упругих коэффициентов и сил, зависящих от них). Устойчивость равновесия зависит также от термодинамических параметров, определяемых мощностью необратимых преобразований в зоне резания (производства тепла). Кроме того, она определяется законами теплообмена, имеющими различную природу. Механическая и термодинамическая подсистемы в совокупности характеризуются нелинейными связями, а система является открытой в термодинамическом смысле.

Из приведенного материала следует, что термодинамическая подсистема оказывает противоречивое влияние на устойчивость точки равновесия в динамической системе резания. Известно, что один из механизмов потери устойчивости равновесия связан со свойством процесса резания, заключающимся в уменьшении сил при увеличении скорости резания в скоростном диапазоне 0,2–2,0 м/с [13, 14]. В этом случае вариации скорости деформационных смещений в направлении скорости резания формируют положительную обратную связь, способствующую потере устойчивости равновесия. Объяснение уменьшения сил резания при возрастании скорости связано с необратимыми преобразованиями подводимой энергии к зоне резания, то есть с законами термодинамики. Здесь увеличение скорости приводит к возрастанию мощности необратимых преобразований в зоне резания, вызывающей, в частности, увеличение производства тепла в зоне обработки. Такой закон, формирующий в реакции со стороны процесса обработки положительную обратную связь, получен экспериментально для установившегося процесса обработки. Однако, как показано выше в зависимости (8), изменение мощности необратимых преобразований при резании вызывает не мгновенное изменение температуры и связанных с ним свойств процесса резания.

Приведенные на рис. 3, а области показывают, что в зависимости от постоянной времени термодинамической подсистемы T_{θ} изменяются фигуративные линии в плоскости варьируемых параметров. Причем при увеличении T_{θ} они, как правило, приводят к расширению области устойчивости. Это связано с тем, что по мере увеличения частоты вариаций скорости не только уменьшается амплитуда вариаций температуры резания, но и вводится дополнительное затухание в систему. Это затухание уменьшает чувствительность вариаций сил, вызванных изменениями колебательной скорости деформационных смещений инструмента в направлении скорости резания. Таким образом, первая тенденция влияния термодинамических процессов на устойчивость характеризуется тем, что термодинамические процессы потенциально направлены на стабилизацию равновесия.

Важное свойство процесса резания, вызывающее потерю устойчивости точки равновесия системы, описано законом формирования новой поверхности резания и зависит от расположения этой поверхности на предыдущем обороте. Это так называемый регенеративный фактор [3, 12, 15]. Его влияние также уменьшается при возрастании инерционности термодинамической подсистемы. Однако эта связь, способствующая потере устойчивости, образуется че-

рез скорости упругих деформационных смещений в направлении оси X_3. Именно поэтому при увеличении коэффициента жесткости $c_{3,3}$ мы наблюдаем некоторое уменьшение области неустойчивого поведения равновесия (рис. 3, б).

На устойчивость равновесия принципиальное влияние оказывает коэффициент $k_\theta^{(X)}$, через который в системе формируется положительная обратная связь. Здесь необходимо учитывать, что при возрастании сил резания за счет температурных деформаций наблюдается не уменьшение, а увеличение площади срезаемого слоя и, как следствие, приращение сил. Исследования показывают (рис. 4), что даже при малых значениях коэффициента $k_\theta^{(X)}$ динамическая система резания может потерять устойчивость равновесия.

Вместе с тем термодинамическая подсистема вызывает дополнительное запаздывание изменения сил резания по отношению к деформационным смещениям. Причем в запаздывании принимают участие мультипликативные члены деформационных смещений и их скоростей, то есть преобразование деформационных смещений в силы определяется нелинейным запаздыванием, которое описывается достаточно сложным законом формирования притягивающих множеств в окрестности равновесия системы. Обычно при потере устойчивости в окрестности равновесия формируется притягивающее множество типа предельного цикла (рис. 5, а).

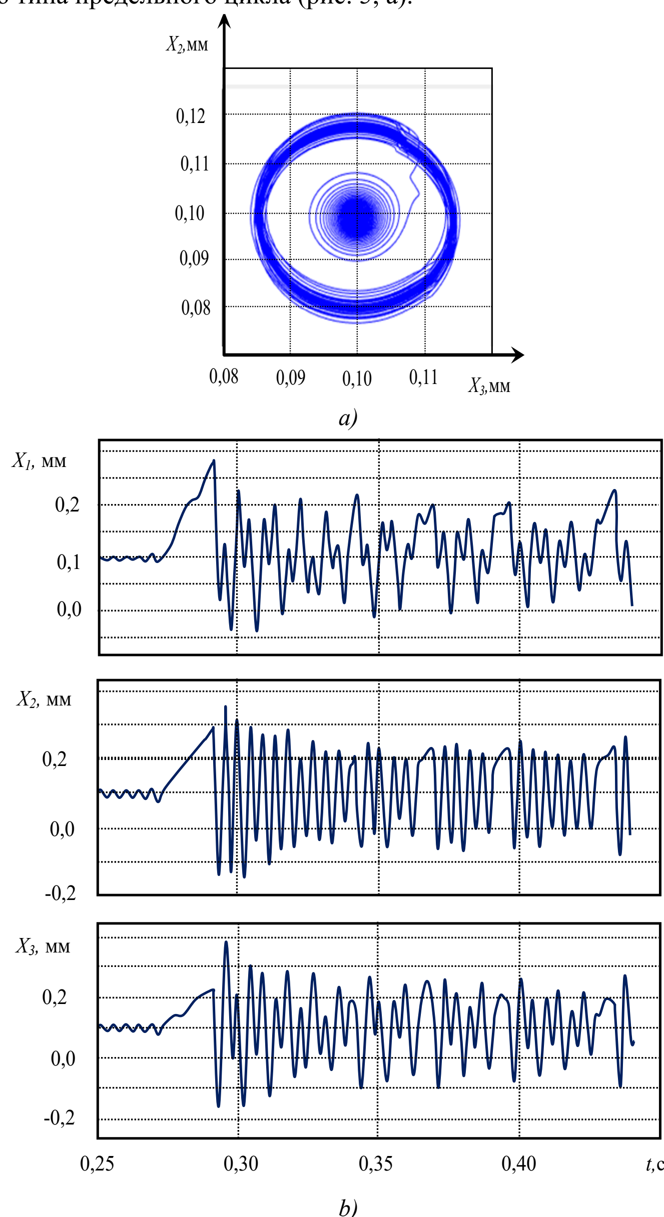


Рис. 5. Пример преобразования предельного цикла (*a*) в траекторию типа хаотической динамики (*b*)

Fig. 5. Example of transforming limit cycle (a) into trajectory of chaotic dynamics type (b)

Однако если увеличить коэффициент $k_\theta^{(X)}$, то в системе спонтанно формируется хаотическая динамика. Вариации деформационных смещений при этом во много раз превышают их значения при автоколебаниях (рис. 5).

Заметим, что без учета термодинамической подсистемы в рассматриваемой модели хаотические колебания не образуются.

Заключение. Термодинамические свойства процесса резания, зависящие от законов необратимых преобразований в зоне обработки и условий теплообмена с окружающей средой, изменяют динамическую систему резания. Как правило, термодинамические процессы в зоне резания направлены на стабилизацию равновесия системы. Однако возможны вариации параметров термодинамической подсистемы, при которых в динамической системе резания не только стабилизируется равновесие, но и в окрестности равновесия формируется хаотическая динамика со значительными колебательными смещениями, влияющими на качество образуемой резанием поверхности. Поэтому при проектировании системы резания кроме традиционных характеристик необходимо выбирать рациональные термодинамические параметры.

Библиографический список

1. Тлустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлустый. —Москва : Машгиз, 1956. —395 с.

2. Tobias, S.-A. Machine Tool Vibrations / S.-A. Tobias. — London : Blackie, 1965. — 350 p.

3. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. — Москва : Машиностроение, 1967. — 359 с.

4. Zakovorotny, V. L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools / V. L. Zakovorotny // WSEAS. Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. — 2015. —Vol. 10. — P. 102–116.

5. Заковоротный, В. Л. Влияние изгибных деформаций инструмента на самоорганизацию и бифуркации динамической системы резания металлов / В. Л. Заковоротный, Д.-Т. Фам, В. С. Быкадор // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2014. — Т. 22, № 3. — С. 40–52.

6. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of cutting / V. L. Zakovorotny [et al.] // Journal of Sound and Vibration. — 2016. — Т. 368. — С. 174–190.

7. Заковоротный, В. Л. Использование синергетической концепции для изучения устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 4. — С. 32–40.

8. Заковоротный, В. Л. Условия параметрического самовозбуждения динамической системы фрезерования концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 6. — С. 10–16.

9. Заковоротный, В. Л. Притягивающие множества при фрезеровании концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 8. — С. 27–33.

10. Заковоротный, В. Л. Параметрическое самовозбуждение динамической системы резания / В. Л. Заковоротный, Т.-Х. Фам // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 13, № 5–6 (74). — С. 97–103.

11. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь) / В. Л. Заковоротный [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 2 (53). — С. 137–146.

12. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) / В. Л. Заковоротный [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 3 (54). — С. 301–311.

13. Мурашкин, Л. С. Прикладная нелинейная механика станков / Л. С. Мурашкин, С. Л. Мурашкин. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 192 с.

14. Заковоротный, В. Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек. — Ростов-на-Дону : Терра, 2006. — 880 с.

15. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A. M. Gouskov [et al.] // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. — 2002. — Vol. 7. — P. 207

16. Хакен, Г. Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии / Г. Хакен. — Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. — 320 с.

17. Рыжкин, А. А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2005. — 311 с.

18. Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. — Москва : Гостехиздат, 1950. — 472 с.

19. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. — Москва : Машиностроение, 1990. — С. 187–190.

20. Леонова, В. Ф. Термодинамика / В. Ф. Леонова. — Москва : Высшая школа, 1968. — 158 с.

21. Макаров, А. Д. Износостойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. — Москва : Машиностроение, 1966. — С. 236–237.

22. Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А. А. Колесникова. — Москва : Физматлит, 2004. — 504 с.

References

1. Tlusty, I. Avtokolebaniya v metallorezhushchikh stankakh. [Self-oscillations in machine tools.] Moscow: Mashgiz, 1956, 395 p. (in Russian).

2. Tobias, S.-A. Machine Tool Vibrations. London: Blackie, 1965, 350 p.

3. Kudinov, V.A. Dinamika stankov. [Machine dynamics.] Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p. (in Russian).

4. Zakovorotny, V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2015, vol. 10, pp. 102–116.

5. Zakovorotny, V.L., Pham D.-T., Bykador, V.S. Vliyanie izgibnykh deformatsiy instrumenta na samoorganizatsiyu i bifurkatsii dinamicheskoy sistemy rezaniya metallov. [Influence of a flexural deformation of a tool on self-organization and bifurcations of dynamical metal cutting system.] Izvestia VUZ. Applied Nonlinear Dynamics, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 40–53 (in Russian).

6. Zakovorotny, V.L., et al. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting. Journal of Sound and Vibration, 2016, vol. 368, pp. 174-190.

7. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Ispol'zovanie sinergeticheskoy kontseptsii dlya izucheniya ustoychivosti formoobrazuyushchikh traektoriy poputnogo frezerovaniya. [Use of synergetic concept for studying stability of forming trajectories of climb cutting.] STIN, 2016, no. 4, pp. 32–40 (in Russian).

8. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Usloviya parametricheskogo samovozbuzhdeniya dinamicheskoy sistemy frezerovaniya kontsevymi frezami. [Conditions for parametric self-excitation of dynamic end milling system.] STIN, 2016, no. 6, pp. 10–16 (in Russian).

9. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Prityagivayushchie mnozhestva pri frezerovanii kontsevymi frezami. [Attracting sets under end milling.] STIN, 2016, no. 8, pp. 27–333(in Russian).

10. Zakovorotny, V.L., Pham D.T. Parametricheskoe samovozbuzhdenie dinamicheskoy sistemy rezaniya. [Parametric self-excitation of cutting dynamic system.] Vestnik of DSTU, 2013, vol. 13, no. 5/6 (74), pp. 97–103 (in Russian).

11. Zakovorotny, V. L., et al. Modelirovanie dinamicheskoy svyazi, formiruemoy protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (skorostnaya svyaz'). [Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (velocity coupling).] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 1, no. 2 (53), pp. 137–146 (in Russian).

12. Zakovorotny, V. L., et al. Modelirovanie dinamicheskoy svyazi, formiruemoy protsessom tocheniya (pozitsionnaya svyaz'). [Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (positional coupling).] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 3 (54), pp. 301–311 (in Russian).

13. Murashkin, L.S., Murashkin, S.L. Prikladnaya nelineynaya mekhanika stankov. [Applied nonlinear machine mechanics.] Leningrad: Mashinostroenie, 1977. — 192 c. (in Russian).

14. Zakovorotny, V.L., Flek, M.F. Dinamika protsessa rezaniya. Sinergeticheskiy podkhod. [Cutting process dynamics. Synergetic approach.] Rostov-on-Don: Terra, 2006, 880 p. (in Russian).

15. Gouskov, A.M., et al. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2002vol. 7, p. 207.

16. Haken, G. Tayny prirody. Sinergetika: uchenie o vzaimodeystvii. [Secrets of Nature. Synergetics: Doctrine of Interaction.] Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Sciences, 2003, 320 p. (in Russian).

17. Ryzhkin, A.A. Teplofizicheskie protsessy pri iznashivanii instrumental'nykh rezhushchikh materialov. [Thermophysical processes under cutting tool materials wear.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2005, 311 p. (in Russian).

18. Lyapunov, A.M. Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya. [General problem on dynamic stability.] Moscow: Gostekhizdat, 1950, 472 p. (in Russian).

19. Reznikov, A.N., Reznikov, L.A. Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh. [Thermal processes in technological systems.] Moscow: Mashinostroenie, 1990, pp. 187–190 (in Russian).

20. Leonova, V.F. Termodinamika. [Thermodynamics.] Moscow: Vysshaya shkola, 1968, 158 p. (in Russian).

21. Makarov, A.D. Iznosostoykost' rezhushchikh instrumentov. [Cutting tools wear resistance.] Moscow: Mashinostroenie, 1966, pp. 236–237 (in Russian).

22. Kolesnikov, A.A., ed. Sinergetika i problemy teorii upravleniya. [Synargetics and control theory problems.] Moscow: Fizmatlit, 2004, 504 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 11.04.2017
Сдана в редакцию 11.04.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 11.04.2017
Submitted 11.04.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Заковоротный Вилор Лаврентьевич,
профессор кафедры "Автоматизация производственных процессов" Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-000-2187-9897
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Винокурова Ирина Андреевна,
магистрант кафедры "Автоматизация производственных процессов" Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-0215-7752
irina_24032011@mail.ru

Authors:

Zakovorotny, Vilor L.,
professor of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-000-2187-9897
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Vinokurova, Irina A.,
Master of Science of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0215-7752
irina_24032011@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 51: 621.891 10.23947/1992-5980-2017-17-3-27-37

Расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом, с учетом зависимости вязкости от давления*

К. С. Ахвердиев[1], Е. О. Лагунова[2], В. В. Василенко[3]**
[1,2,3] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Design model of radial melt-lubricated bearing with account of pressure-viscosity ratio ***

K. S. Akhverdiev[1], E. O. Lagunova[2], V. V. Vasilenko[3]**
[1,2,3] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена разработке расчетной модели бесконечного радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия, с учетом зависимости вязкости смазочного материала от давления. Рассмотрены параметры, обусловленные расплавом легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки от удельной теплоты плавления, и зависимости вязкости смазочного материала от давления. Дана оценка влияния указанных факторов на основные рабочие характеристики трибосистемы. Цель работы — формирование уточненных расчетных моделей бесконечных радиальных подшипников, работающих в режиме гидродинамического смазывания при наличии смазочного материала и расплава легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки, с учетом зависимости смазочного материала от давления для применения в инженерной практике.

Материалы и методы. Предложены новые математические модели, описывающие движение несжимаемого смазочного материала в приближении для тонкого слоя, уравнение неразрывности и выражения скорости диссипации энергии для определения профиля расплавленной поверхности легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки с учетом влияния ряда дополнительных факторов. Выполнен сравнительный анализ вновь полученных и уже имеющихся результатов, что подтвердило приближенность новой модели к реальной практике.

Результаты исследования. Разработаны новые многопараметрические выражения для основных рабочих характеристик рассматриваемой пары трения, учитывающих зависимость смазочного материала от давления при наличии смазочного материала и расплава легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки. Дана оценка влияния параметров, учитывающих целую гамму переменных факторов, обусловленных расплавом поверхности легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки от удельной теплоты плавления.

Обсуждение и заключения. В предлагаемой работе обобщено влияние пока еще не исследованных факторов, что существенно усложняет задачу, но делает ее решение универсальным и востребованным в современных трибоузлах. Результаты численного анализа полученных теоретических исследова-

Introduction. The development of the design model of the infinite radial bearing greased by the fusible coating melt with account of the lubricant pressure-viscosity ratio is considered. The parameters caused by the fusible coating melt of the bearing bush against the specific heat of fusion, and the lubricant pressure-viscosity ratio, are studied. The effect of these factors on the key operating data of the tribosystem is estimated. The work objective is the generation of the refined design models of infinite radial bearings operating in the hydrodynamic lubrication mode with a lubricant and a fusible coating melt of the bearing bush taking into account the lubricant pressure-viscosity ratio for the application in the engineering practice.

Materials and Methods. New mathematical models describing the incompressible lubricant movement to the approximation for a thin layer, the equation of continuity, and the energy dissipation rate ratio, for determining the profile of the melted surface of the fusible coating of the bearing bush with account of the effect of several supplementary factors, are proposed. A comparative analysis of the newly obtained and already available results is performed. That has confirmed the approximation of the new model to the actual practice.

Research Results. New multiparameter expressions for the key operating characteristics of the friction pair under study taking into account the lubricant pressure-viscosity ratio in the presence of a lubricant and a fusible coating melt of the bearing bushing are developed. The effect of the parameters considering a whole array of variables caused by the fusible coating melt of the bearing bushing on the specific heat of fusion is estimated.

Discussion and Conclusions. The influence of the factors not yet studied which essentially complicates the task but makes its solution universal and required in the present-day tribological components, is summarized. The numerical analysis results of the ob-

* Работа выполнена по гранту ОАО РЖД № 2210370/22.12.2016 на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.
** E-mail: vm@rgups.ru, murman1963@yandex.ru, lagunova@rambler.ru, vvv_voen@rgups.ru
*** The research is done on Russian Railways JSC grant no. 2210370/22.12.2016 for the development of scientific and pedagogical schools in railway transportation.

ний показывают, что опоры скольжения, работающие на расплаве легкоплавкого покрытия, обладают аномально низким коэффициентом трения (зависимость коэффициента трения от параметра, обусловленного расплавом, близкая линейной). Полученные результаты могут быть использованы в условиях, когда подача смазочного материала связана с трудностями, в частности, в таких отраслях, как машиностроение, авиастроение, приборостроение и т. д.

tained theoretical studies show that slider bearings operating on the fusible coating melt have an abnormally low friction factor (the friction coefficient depends on the parameter due to the melt which is close to linear). The obtained results can be used under the conditions when the lubricant supply involves some problems, in particular, in such branches as engineering, aircraft building, instrument making, etc.

Ключевые слова: гидродинамика, радиальный подшипник, вязкий несжимаемый жидкий смазочный материал, расплавленная поверхность подшипниковой втулки, зависимость вязкости смазочного материала от давления.

Keywords: hydrodynamics, radial bearing, viscous incompressible liquid lubricant, melted surface of bearing bush, lubricant pressure-viscosity ratio.

Образец для цитирования: Ахвердиев, К. С. Расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом, с учетом зависимости вязкости от давления / К. С. Ахвердиев, Е. О. Лагунова, В. В. Василенко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 27–37.

For citation: K.S. Akhverdiev, E.O. Lagunova, V.V. Vasilenko. Design model of radial melt-lubricated bearing with account of pressure-viscosity ratio. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 27–37.

Введение. В современном машиностроении трибоузлы для новых машин проектируются, как правило, с учетом увеличения статических и ударных нагрузок, действующих на опоры скольжения. Следует отметить, что одним из важнейших конструктивных элементов подшипников жидкостного трения является смазочная среда.

Одним из методов решения конструктивно-эксплуатационных задач может быть применение смазывания расплавом легкоплавкого покрытия подшипниковых втулок.

В настоящее время существует значительное число технологий диффузионной металлизации, большинство из которых являются сложными, требуют применения дорогостоящего оборудования, что делает их промышленно нереализуемыми. На этом фоне выгодно отличается технология диффузионной металлизации сталей из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Ее перспективность связана с простотой реализации, возможностью использования стандартного термического оборудования, совмещения данной технологии с термической обработкой покрываемых изделий и т. п. Однако самое главное — возможность получения качественных изделий и регулирования свойств покрытий за счет варьирования технологических режимов.

Диффузионная металлизация из среды легкоплавких жидкометаллических растворов основана на явлении селективного изотермического переноса металлических элементов на металлические материалы [1–4]. Технологически данный процесс осуществляется путем погружения и выдержки изделий в легкоплавком расплаве, содержащем в растворенном состоянии элемент, на базе которого формируются диффузионные покрытия.

Использование данной технологии позволяет получать на поверхности изделий однокомпонентные и многокомпонентные диффузионные покрытия на базе различных металлических элементов.

Смазывание жидкими металлами применяют при температурах, при которых обычные смазочные среды претерпевают необратимые физико-химические изменения. Преимущество смазывания расплавом состоит в том, что смазочный материал образуется в области контакта, где это необходимо. Плавление доставляет достаточное количество смазочного материала в зону трения, механические и конструктивные сложности, связанные с его подачей, отсутствуют. Смазывание расплавом изучалось во многих прикладных задачах, в частности в процессах формоизменения и резания металлов [5–7]. Большое количество работ [8–14] посвящено гидродинамическому расчету радиальных подшипников бесконечной длины в условиях отсутствия смазочного вещества и учета зависимости вязкости смазочного материала от давления. Существенным недостатком рассматриваемой пары трения, работающей на смазывании расплавом, является низкая несущая способность. Кроме того, процесс смазывания не является самоподдерживающимся.

Таким образом, разработка расчетной модели подшипников скольжения, работающих на смазочных материалах в виде металлических расплавов, с учетом вышеуказанных аспектов функционирования, представляет собой одно из перспективных направлений теоретических исследований современной трибологии. Последнее определяет новизну и актуальность полученного решения.

Научная новизна предлагаемого решения и уточнения расчетной модели заключается в оценке влияния параметра, обусловленного расплавом легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки, и параметра, характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от давления, обеспечивающих опорам скольжения аномально низкий коэффициент трения.

Цель работы: формирование уточненной расчетной модели опоры скольжения в режиме гидродинамического смазывания при наличии смазочного материала и расплава легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки с учетом зависимости вязкости смазочного материала от давления.

Постановка задачи. Рассматривается модель установившегося движения вязкого несжимаемого смазочного материала в рабочем зазоре бесконечного радиального подшипника скольжения, покрытого легкоплавким расплавом.

Вал вращается с угловой скоростью Ω, а подшипниковая втулка неподвижна. Предполагается, что пространство между эксцентрично расположенными валом и подшипником полностью заполнено смазочным материалом, а подшипниковая втулка выполнена из материала с низкой температурой плавления.

Рассматриваются условия, когда все тепло, выделяющееся в смазочной пленке, идет на плавление поверхности материала подшипниковой втулки.

Задается следующая зависимость вязкости смазочного материала от давления:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha p'}, \tag{1}$$

где μ_0 — характерная вязкость; μ' — коэффициент динамической вязкости смазочного материала; p' — гидродинамическое давление в смазочном слое; α — постоянная.

Исходные уравнения и граничные условия. Движение смазочного материала описывается уравнением течения вязкой несжимаемой жидкости в приближении для тонкого слоя и уравнением неразрывности:

$$\mu' \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r'^2} = \frac{dp'}{d\theta}, \quad \frac{\partial v_{r'}}{\partial r'} + \frac{v_{r'}}{r'} + \frac{1}{r'}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0. \tag{2}$$

Здесь $v_\theta, v_{r'}$ — компоненты вектора скорости смазочной среды; p' — гидродинамическое давление в смазочном слое; μ' — коэффициент динамической вязкости.

Рассмотрим полярную систему координат с полюсом в центре подшипниковой втулки (рис. 1).

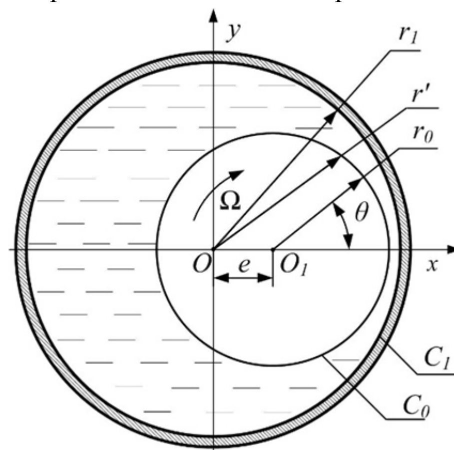


Рис. 1. Расчетная схема радиального подшипника с легкоплавким покрытием

Fig. 1. Analytic model of radial bearing with fusible coating

В этом случае уравнения контура вала расплавленной поверхности легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки и поверхности подшипниковой втулки, покрытой металлическим расплавом, запишем в виде:

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1, \qquad r' = r_1 + \lambda' f(\theta), \tag{3}$$

где $H = \varepsilon\cos\theta - \frac{1}{2}\varepsilon^2\sin^2\theta + \ldots, \quad \varepsilon = \frac{e}{r_0}$; r_0 — радиус вала; r_1 — радиус подшипниковой втулки, покрытой металлическим расплавом; e — эксцентриситет; ε — относительный эксцентриситет; $\lambda' f(\theta)$ — ограниченная функция при $\theta \in [0 \div 2\pi]$ подлежит определению.

Граничные условия в рассматриваемом случае с точностью до членов $O(\varepsilon^2)$ запишем в виде:

$$\begin{aligned} &v_\theta = 0, \quad v_{r'} = 0 \quad при \quad r' = r_1 + \lambda' f(\theta); \\ &v_\theta = r_0\Omega, \quad v_{r'} = -\Omega e\sin\theta, \quad при \quad r' = r_0 + e\cos\theta; \\ &p'(0) = p'(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}. \end{aligned} \tag{4}$$

Для определения функции $\lambda' f(\theta)$, обусловленной расплавленной поверхностью подшипника, воспользуемся формулой скорости диссипаций энергий:

$$\frac{d\lambda' f(\theta) r_0}{d\theta} \cdot \Omega L' = 2\mu \int\limits_{r_1+\lambda' f(\theta)}^{r_0+e\cos\theta} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r'}\right)^2 dr', \tag{5}$$

где L' — удельная теплота плавления на единицу объема.

Переход к безразмерным переменным реализуется на основе следующих формул:

$$r' = r_1 - \delta r,\ \delta = r_1 - r_0;\quad v_\theta = \Omega r_0 v;\quad v_{r'} = \Omega \delta u;\quad p' = p^* p;\quad p^* = \frac{\mu_0 \Omega r_0^2}{\delta^2};$$
$$\mu' = \mu_0 \mu;\quad \alpha = \frac{\alpha}{p^*}. \tag{6}$$

Выполняя подстановку (6) в систему дифференциальных уравнений (2) и (5), а также в граничные условия (4), придем к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0;\quad \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = e^{-\alpha p}\frac{dp}{d\theta};\qquad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0; \tag{7}$$

$$\frac{d\lambda' f(\theta)}{d\theta} = -K \int\limits_{-\eta_1 f(\theta)}^{1-\eta\cos\theta} \left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2 dr,\qquad K = \frac{2\mu\Omega r_0}{L'\delta} \tag{8}$$

и граничным условиям:

$$v = 1,\quad u = -\eta\sin\theta,\quad \textit{при}\quad r = 1 - \eta\cos\theta;$$
$$v = 0,\quad u = 0\quad \textit{при}\quad r = 0 - \Phi(\theta);\quad p(0) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}, \tag{9}$$

где $\eta = \dfrac{e}{\delta};\quad \eta_1 = \dfrac{\lambda'}{\delta};\quad \Phi(\theta) = \eta_1 f(\theta).$

Пусть $Z = e^{-\alpha p}$. Продифференцировав обе части равенства, получим:

$$\frac{dZ}{d\theta} = -\alpha e^{-\alpha p}\frac{dp}{d\theta}\quad \text{или}\quad e^{-\alpha p}\frac{dp}{d\theta} = -\frac{1}{\alpha}\frac{dZ}{d\theta}.$$

Тогда уравнения (7) и (8) примут следующий вид:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = -\frac{1}{\alpha}\frac{dZ}{d\theta};\qquad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0; \tag{10}$$

$$Z\frac{d\Phi(\theta)}{d\theta} = -K \int\limits_{0}^{1-\eta\cos\theta} \left(\frac{\partial v_0}{\partial r}\right)^2 dr \tag{11}$$

с соответствующими граничными условиями:

$$v = 1,\quad u = -\eta\sin\theta,\quad \textit{при}\quad r = 1 - \eta\cos\theta;$$
$$v = 0,\quad u = 0\quad \textit{при}\quad r = 0 - \Phi(\theta);\quad Z(0) = Z(2\pi) = e^{-\alpha\frac{p_g}{p^*}}. \tag{12}$$

В качестве малого параметра принимая K, обусловленный расплавом и скоростью диссипации энергии, будем искать функцию $\Phi(\theta)$ в виде:

$$\Phi(\theta) = -K\,\Phi_1(\theta) - K^2\,\Phi_2(\theta) - K^3\,\Phi_3(\theta) - \ldots = H \tag{13}$$

где $H = -K\,\Phi_1(\theta) - K^2\,\Phi_2(\theta) - K^3\,\Phi_3(\theta) - \ldots$.

Граничные условия для безразмерных компонентов скорости u и v на контуре $r = -\Phi(\theta)$ можно записать в виде:

$$u(0 - H(\theta)) = v(0) - \left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_{r=0} H(\theta) - \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2}\right)_{r=0} H^2(\theta) - \ldots = 0$$

$$u(0 - H(\theta)) = u(0) - \left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{r=0} H(\theta) - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}\right)_{r=0} H^2(\theta) - \ldots = 0 \tag{14}$$

Асимптотическое решение системы дифференциальных уравнений (10)–(11) с учетом граничных условий (12) и (14) будем искать в виде рядов по степеням малого параметра K:

$$v = v_0(r,\theta) + Kv_1(r,\theta) + K^2 v_2(r,\theta) + \ldots;$$

$$u = u_0(r,\theta) + Ku_1(r,\theta) + K^2 u_2(r,\theta) + \ldots;$$

$$\Phi(\theta) = -K\Phi_1(\theta) - K^2\Phi_2(\theta) - K^3\Phi_3(\theta) - \quad ;$$

$$\Phi(\theta) = -K\,\Phi_1(\theta) - K^2\,\Phi_2(\theta) - K^3\,\Phi_3(\theta) - \ldots;$$

$$Z = Z_0 + KZ_1(\theta) + K^2 Z_2(\theta) + K^3 Z_3(\theta)\ldots \tag{15}$$

Выполняя подстановку (15) в систему дифференциальных уравнений (10)–(11) с учетом граничных условий (12), получим следующие уравнения.

Для нулевого приближения:

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial r^2} = -\frac{1}{\alpha}\frac{dZ_0}{d\theta}, \qquad \frac{\partial v_0}{\partial\theta} + \frac{\partial u_0}{\partial r} = 0 \tag{16}$$

с граничными условиями

$$\begin{gathered} v_0 = 1, \quad u_0 = -\eta\sin\theta \quad \text{при} \quad r = 1 - \eta\cos\theta; \\ v_0 = 0, \quad u_0 = 0 \quad \text{при} \quad r = 0; \\ Z_0(0) = Z_0(2\pi) = e^{-\alpha\frac{p_g}{p^*}}. \end{gathered} \tag{17}$$

Для первого приближения:

$$\begin{gathered} \frac{\partial^2 v_1}{\partial r^2} = -\frac{1}{\alpha}\frac{dZ_1}{d\theta}; \quad \frac{\partial v_1}{\partial\theta} + \frac{\partial u_1}{\partial r} = 0; \\ -Z_0\frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta} = \int\limits_0^{1-\eta\cos\theta}\left(\frac{\partial v_0}{\partial r}\right)^2 dr \end{gathered} \tag{18}$$

с граничными условиями

$$\begin{gathered} v_1 = \left(\frac{\partial v_0}{\partial r}\right)_{r=0}\cdot\Phi_1(\theta); \qquad u_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial r}\right)_{r=0}\cdot\Phi_1(\theta); \\ v_1 = 0; \quad u_1 = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 - \eta\cos\theta; \\ Z_1(0) = Z_1(2\pi) = 0; \quad K\Phi_1(0) = K\alpha, \quad \Phi(0) = \Phi(2\pi) = \alpha. \end{gathered} \tag{19}$$

Точное автомодельное решение. Точное автомодельное решение задачи для нулевого приближения будем искать в виде:

$$\begin{gathered} v_0 = \frac{\partial\psi_0}{\partial r} + V_0(r,\theta); \quad u_0 = -\frac{\partial\psi_0}{\partial\theta} + U_0(r,\theta); \\ \psi_0(r,\theta) = \psi_0(\xi); \quad \xi = \frac{r}{1-\eta\cos\theta}; \\ V_0(r,\theta) = v(\xi); \quad U_0(r,\theta) = -u_0(\xi)\cdot h'(\theta); \\ \frac{dZ_0}{d\theta} = -\alpha\left(\frac{C_1}{h^2(\theta)} + \frac{C_2}{h^3(\theta)}\right); \quad h(\theta) = 1 - \eta\cos\theta. \end{gathered} \tag{20}$$

Подставляя (20) в систему дифференциальных уравнений (16) с учетом граничных условий (17), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\psi_0'' = C_2; \quad v_0'' = C_1; \quad u_0'(\xi) - \xi v_0'(\xi) = 0 \tag{21}$$

и граничные условия:

$$\begin{gathered} \psi_0'(0) = 0, \quad \psi_0'(1) = 0, \quad u_0(1) = -\eta\sin\theta, \quad v_0(1) = 0; \\ u_0(0) = 0, \quad v_0(0) = 1, \quad \int\limits_0^1 v_0(\xi)\,d\xi = 0. \end{gathered} \tag{22}$$

Непосредственным интегрированием получим:

$$\psi_0'(\xi) = \frac{C_2}{2}\left(\xi^2 - \xi\right), \quad v_0(\xi) = C_1\frac{\xi^2}{2} - \left(1 + \frac{C_1}{2}\right)\xi + 1, \quad C_1 = 6. \tag{23}$$

Из условия $Z_0(0) = Z_0(2\pi) = e^{-\alpha\frac{p_g}{p^*}}$ получим следующее выражение:

$$C_2 = -C_1 \frac{\int\limits_0^{2\pi} \frac{d\theta}{h^2(\theta)}}{\int\limits_0^{2\pi} \frac{d\theta}{h^3(\theta)}} = -\frac{12\left(1-\eta^2\right)}{2+\eta^2}. \tag{24}$$

Определение гидродинамического давления. С учетом (24) для Z_0 получим:

$$Z_0 = -\alpha\left(C_1 J_2(\theta) + C_2 J_3(\theta)\right) + e^{-\alpha\frac{p_g}{p^*}} = \frac{6\alpha\sin\theta}{\left(2+\eta^2\right)\left(1-\eta\cos\theta\right)}\left(\eta + \frac{1}{\left(1-\eta\cos\theta\right)}\right) + e^{-\alpha\frac{p_g}{p^*}}. \tag{25}$$

Общеизвестно, что в случае решения задачи плоской гидродинамической теории смазки давление определяется с точностью до произвольной постоянной. Значение этой постоянной C_2 устанавливается из условия отсутствия отрицательных значений давления в смазочном слое.

Для нахождения значения Z для первого приближения необходимо сначала определить функцию $\Phi_1(\theta)$.

Для определения $\Phi_1(\theta)$ с учетом уравнения (22) придем к следующему уравнению:

$$\frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta} = \frac{h(\theta)}{Z_0}\int\limits_0^1 \left(\frac{\psi_0''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{v_0'(\xi)}{h(\theta)}\right)^2 d\xi. \tag{26}$$

Интегрируя уравнение (26), получим:

$$\Phi_1(\theta) = \int\limits_0^\theta \frac{\Delta_1 d\theta}{Z_0 h^3(\theta)} + \int\limits_0^\theta \frac{\Delta_2 d\theta}{Z_0 h^2(\theta)} + \int\limits_0^\theta \frac{\Delta_3 d\theta}{Z_0 h(\theta)}, \tag{27}$$

где $\Delta_1 = \int\limits_0^1 \left(\psi''(\xi)\right)^2 d\xi = \frac{C_2^2}{12}$; $\Delta_2 = \int\limits_0^1 2\psi''(\xi)\cdot v'(\xi)d\xi = \frac{1}{6}C_1C_2$; $\Delta_3 = \int\limits_0^1 \left(v'(\xi)\right)^2 d\xi = 4$;

$$\sup\limits_{[0\div 2\pi]} Z_0 = \sup\limits_{[0\div 2\pi]}\left|\frac{6\alpha\sin\theta}{\left(2+\eta^2\right)\left(1-\eta\cos\theta\right)}\left(\eta+\frac{1}{\left(1-\eta\cos\theta\right)}\right) + e^{-\alpha\frac{p_g}{p^*}}\right| = \frac{1}{64}. \tag{28}$$

Решая уравнения (27)–(28) с учетом $\Phi_1(0) = \alpha$, получим:

$$\Phi_1(\theta) = \frac{1}{64}\left[\frac{4\left(1+2\eta^2\right)}{\left(2+\eta^2\right)}\operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{1+\eta}{1-\eta}}\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}\right) - \frac{6\eta\left(2\eta^2+1\right)\sin\theta}{\left(2+\eta^2\right)^2\left(1-\eta\cos\theta\right)} + \frac{6\left(1-\eta^2\right)\sin\theta}{\left(2+\eta^2\right)^2\left(1-\eta\cos\theta\right)^2}\right] + \alpha. \tag{29}$$

Точное автомодельное решение задачи для первого приближения будем искать в виде:

$$v_1 = \frac{\partial\psi_1}{\partial r} + V_1(r,\theta); \quad u_1 = -\frac{\partial\psi_1}{\partial\theta} + U_1(r,\theta);$$

$$\psi_1(r,\theta) = \psi_1(\xi); \quad \xi = \frac{r}{1-\eta\cos\theta};$$

$$V_1(r,\theta) = v(\xi); \quad U_1(r,\theta) = -u_1(\xi)\cdot h'(\theta);$$

$$\frac{dZ_1}{d\theta} = -\alpha\left(\frac{\approx{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\approx{C}_2}{h^3(\theta)}\right); \quad h(\theta) = 1-\eta\cos\theta. \tag{30}$$

Подставляя (30) в систему дифференциальных уравнений (18) с учетом граничных условий (19), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\psi_1'''(\xi) = \approx{C}_2; \quad v''(\xi)_1 = \approx{C}_1; \quad u_1'(\xi) - \xi v_1'(\xi) = 0 \tag{31}$$

и граничные условия:

$$\psi_1'(0) = 0, \quad \psi_1'(1) = 0, \quad u_1(1) = 0, \quad v_1(1) = 0;$$

$$u_1(0) = 0, \quad v_1(0) = M, \quad \int\limits_0^1 v_1(\xi)d\xi = 0. \tag{32}$$

Непосредственным интегрированием получим:

$$\psi_1'(\xi) = \frac{\approx{C}_2}{2}\left(\xi^2 - \xi\right), \quad v_1(\xi) = \approx{C}_1\frac{\xi^2}{2} + \left(\frac{\approx{C}_1}{2} - M\right)\xi + M, \quad \approx{C}_1 = 6M. \tag{33}$$

Из условия $Z_1(0) = Z_1(2\pi) = 0$ получим следующее выражение:

$$\tilde{\tilde{C}}_2 = -\frac{12M\left(1-\eta^2\right)}{2+\eta^2}, \tag{34}$$

где

$$M = \sup_{\theta\in[0:2\pi]}\left|\frac{\partial v_0}{\partial r}\right|_{r=0}\cdot\Phi_1(\theta)\right| = \sup_{\theta\in[0:2\pi]}\left(\frac{-2}{1-\eta\cos\theta}+\frac{6\left(1-\eta^2\right)}{\left(2+\eta^2\right)\left(1-\eta\cos\theta\right)^2}\right)\times$$

$$\times\left[\frac{1}{64}\left(\frac{4\left(1+2\eta^2\right)}{\left(2+\eta^2\right)}\operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{1+\eta}{1-\eta}}\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}\right)-\frac{6\eta\left(2\eta^2+1\right)\sin\theta}{\left(2+\eta^2\right)^2\left(1-\eta\cos\theta\right)}+\frac{6\left(1-\eta^2\right)\sin\theta}{\left(2+\eta^2\right)^2\left(1-\eta\cos\theta\right)^2}\right)+\alpha\right].$$

С учетом (34) для Z_1 получим:

$$Z_1 = -\alpha\left(\tilde{\tilde{C}}_1 J_2(\theta)+\tilde{\tilde{C}}_2 J_3(\theta)\right) = \frac{6\alpha M\sin\theta}{\left(2+\eta^2\right)\left(1-\eta\cos\theta\right)}\left(\eta+\frac{1}{\left(1-\eta\cos\theta\right)}\right). \tag{35}$$

Тогда для $Z = Z_0 + KZ_1$ получим следующее выражение:

$$Z = \frac{6\alpha\sin\theta}{\left(2+\eta^2\right)\left(1-\eta\cos\theta\right)}\left(\eta+\frac{1}{\left(1-\eta\cos\theta\right)}\right)\left(1+KM\right)+e^{-\alpha\frac{p_g}{p^*}} \tag{36}$$

или $e^{-\alpha p} = \Delta\alpha\left(1+KM\right)+e^{-\alpha\frac{p_g}{p^*}}$,

где $\Delta = \dfrac{6\sin\theta}{\left(2+\eta^2\right)\left(1-\eta\cos\theta\right)}\left(\eta+\dfrac{1}{\left(1-\eta\cos\theta\right)}\right).$

Применяя разложение в ряд Тейлора для функций $e^{-\alpha p}$, $e^{-\alpha\frac{p_g}{p^*}}$, получим:

$$1-\alpha p+\frac{\alpha^2 p^2}{2}-1+\alpha\frac{p_g}{p^*}-\frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2 = \alpha\Delta\left(1+KM\right). \tag{37}$$

Решая уравнение (37) с точностью до членов $O(\alpha)^3$, $O(\xi)^2$, $O\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^3$ для гидродинамического давления, получим

$$p = \frac{P_g}{P^*}-\Delta\left(1+KM\right)\left(1+\alpha\frac{p_g}{p^*}-\frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right). \tag{38}$$

Результаты исследований и их обсуждение. Перейдем к определению основных рабочих характеристик подшипника.

С учетом (16), (18) и (38) для составляющей вектора поддерживающей силы и силы трения получим:

$$R_y = \frac{\mu_0\Omega r_0^3}{\delta^2}\int_0^{2\pi}\left(p-\frac{P_g}{P^*}\right)\sin\theta d\theta = \frac{6\mu_0\Omega r_0^3\pi\left(1+KM\right)\left(\eta\left(1-\eta^2\right)+1\right)}{\delta^2\left(2+\eta^2\right)\sqrt{\left(1-\eta^2\right)^3}}\left(1+\alpha\frac{p_g}{p^*}-\frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right);$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{\mu_0\Omega r_0^2}{\delta}\int_0^{2\pi}\left[\left.\frac{\partial v_0}{\partial r}\right|_{r=0}+K\left.\frac{\partial v_1}{\partial r}\right|_{r=0}\right]d\theta = \frac{4\pi\mu_0\Omega r_0^2}{\delta}\left(\frac{-\left(1+2KM\right)}{\sqrt{1-\eta^2}}+\frac{3\left(1-\eta^2\right)\left(1+KM\right)}{\left(2+\eta^2\right)\sqrt{\left(1-\eta^2\right)^3}}\right)\left(1-\alpha p+\frac{\alpha^2 p^2}{2}\right).$$

$$R_x = \frac{\mu_0\Omega r_0^3}{\delta^2}\int_0^{2\pi}\left(p-\frac{P_g}{P^*}\right)\cos\theta d\theta = 0. \tag{39}$$

Для проверочных расчетов на основе полученных теоретических моделей использованы следующие значения:

$\mu_0 = 0{,}00595$ Нс/м^2; $\eta = 0{,}3\ldots1$ м; $r_0 = 0{,}019995\ldots0{,}0493$ м;

$\Omega = 100\ldots1800$ с$^{-1}$; $\delta = 0{,}05\cdot10^{-3}\ldots0{,}07\cdot10^{-3}$; $K = 0{,}00052\ldots0{,}0000022$;

$P_g = 0{,}2$ МПа; $\alpha = 0{,}1$; $L' = 35{,}33\ldots38{,}1$ Н/м^2; $M = 0{,}16\ldots25{,}6$.

По результатам численных расчетов построены графики, приведенные на рис. 2–5.

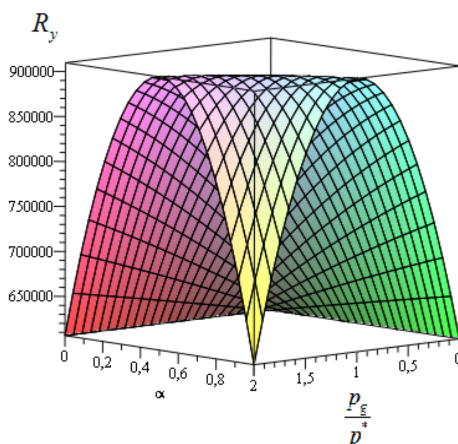


Рис. 2. Зависимость компонента поддерживающей силы (R_y) от параметра α,

характеризующего зависимость вязкости от давления, и от $\frac{p_g}{p^*}$, характеризующего давление на торцах интервала, при $K = 0$

Fig. 2. Dependence of supporting force component (R_y) on parameter α which characterizes pressure-viscosity ratio,

and on $\frac{p_g}{p^*}$ describing pressure at the interval ends at K = 0

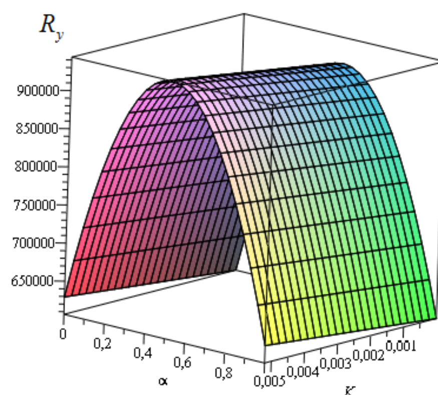


Рис. 3. Зависимость компонентов поддерживающей силы (R_y) от параметра α, характеризующего зависимость вязкости от давления, и от *K*, обусловленного расплавом и скоростью диссипации энергии

Fig. 3. Dependence of supporting force components (R_y) on parameter α which characterizes pressure-viscosity ratio, and on *K* caused by melt and energy dissipation rate

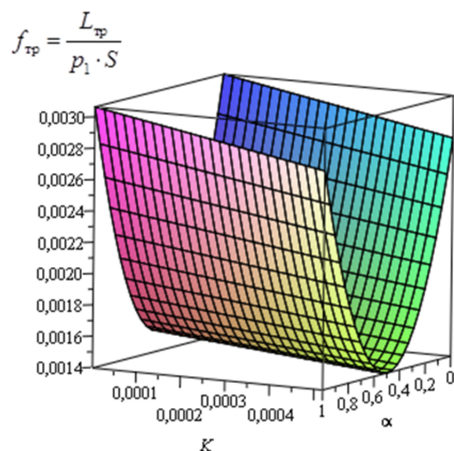


Рис. 4. Зависимость коэффициента силы трения от параметра *K*, обусловленного расплавом и скоростью диссипации энергии, и от α, характеризующего зависимость вязкости от давления

Fig. 4. Dependence of friction force factor on parameter K which caused by melt and energy dissipation rate, and on α characterizing pressure-viscosity ratio

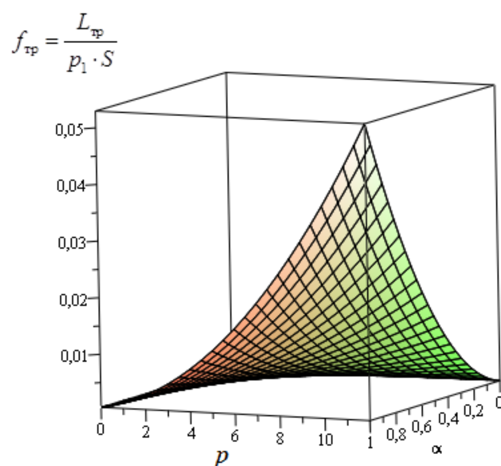


Рис. 5. Зависимость коэффициента силы трения от параметра α, характеризующего зависимость вязкости от давления, и от гидродинамического давления p, при $K = 0$

Fig. 5. Dependence of friction force factor on parameter α characterizing pressure-viscosity ratio, and on hydrodynamic pressure p at K = 0

Выводы. Анализ полученных расчетных моделей и графиков позволяет сделать ряд выводов.

1. Получена уточненная расчетная модель радиального подшипника скольжения, работающего в условиях гидродинамического смазывания расплавом легкоплавкого покрытия с учетом зависимости вязкости от давления.

2. Показан значительный вклад конструктивного параметра K, обусловленного расплавом. С увеличением конструктивного параметра K коэффициент трения уменьшается на 60 %, а несущая способность увеличивается на 16 %.

3. Зависимость коэффициента трения от конструктивного параметра K, обусловленного расплавом, близка K линейной в принятом нами приближении в пределах 0,0014–0,003.

Библиографический список

1. Кропачев, Д. Ю. Способы оперативного измерения температуры расплава металлов для нужд машиностроительных предприятий //Литье и металлургия. — 2012. — № 3 (66). — С. 126–127.

2. Уилсон, Р. Смазка с расплавом / Р. Уилсон // Проблемы трения и смазки. — 1976. — № 1. — С. 19.

3. Беретта, А. Подшипники скольжения, смазываемые собственным расплавом или продуктом сублимации / А. Беретта, Д. Ниро, Ф. Сильвестри // Труды Амер. о-ва инж.-мех. — 1992. — № 1. — С. 86–90.

4. Физические величины. Справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — Москва : Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

5. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, В. Я. Хавин. — Ленинград : Химия, 1991. — 432 с.

6. Перельман, В. И. Краткий справочник химика / В. И. Перельман. — Москва ; Ленинград : Химия, 1964. — 620 с.

7. Справочник по пайке / под ред. И. Е. Петрунина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 1984. — 576 с.

8. Котельницкая, Л. И. Расчет радиальных с эффективной работой на смазке с расплавом в турбулентном режиме / Л. И. Котельницкая, Н. Н. Демидова // Вестник Ростов. гос. ун-та путей сообщения. — 2002. — № 2. — С. 18–23.

9. Приходько, В. М. Математическая модель гидродинамической смазки при плавлении опорной поверхности радиального подшипника / В. М. Приходько, Л. И. Котельницкая // Трение и износ. — 2001. — Т. 22, № 6. — С. 606–608.

10. Ахвердиев, К. С. Об одном решении задачи о гидродинамической смазке жидкостью, образующейся при плавлении направляющей, при наличии принудительной смазки / К. С. Ахвердиев, Л. И. Котельницкая, Н. С. Воронин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2002. — Т. 2, № 2 (12). — С. 99–103.

11. Ахвердиев, К. С. Установившееся движение вязкоупругой жидкости между наклонным ползуном и направляющей с учетом сил инерции смазочной композиции / К. С. Ахвердиев, И. А. Журба // Трение и износ. — 2004. — Т. 25, № 6. — С. 567–576.

12. Мукутадзе, М. А. Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на основе развития гидродинамической и реодинамической теории смазки : дис. … д-ра техн. наук / М. А. Мукутадзе. — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 363–383.

13. Akhverdiev, K. S. Radial bearing with porous barrel / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, A. M. Mukutadze // Proceedings of Academic World : International Conference. — San Francisco : Institute of Research and Journals, 2016. — P. 28—31.

14. Analytical method for prognosis of values of micropolar lubrication criteria providing stable operation of radial sliding bearing / K. S. Akhverdiyev // Journal of Friction and Wear. — 2008. — Vol. 29, № 2. — P. 184–191.

References

1. Kropachev, D.Y., Grishin, A.A., Maslo, A.D. Sposoby operativnogo izmereniya temperatury rasplava metallov dlya nuzhd mashinostroitel'nykh predpriyatiy. [Ways of operative measurement of metals melt temperature for needs of machine-building enterprises.] Foundry and Metallurgy, 2012, no. 3 (66), pp. 126–127 (in Russian).

2. Wilson, R. Smazka s rasplavom. [Lubricant with melt.] Problemy treniya i smazki, 1976, no. 1, pp. 19 (in Russian).

3. Beretta, A., Niro, D., Sylvestry, F. Podshipniki skol'zheniya, smazyvaemye sobstvennym rasplavom ili produktom sublimatsii. [Plain bearings lubricated by their own melt or sublimation product.] ASME Proceedings, 1992, no. 1, pp. 86–90 (in Russian).

4. Grigoryeva, I.S., Meylikhova, E.Z., eds. Fizicheskie velichiny. Spravochnik. [Physical values. Reference book.] Moscow: Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (in Russian).

5. Rabinovich, V.A., Khavin, V.Y. Kratkiy khimicheskiy spravochnik. [Quick reference book in chemistry.] Leningrad: Khimiya, 1991, 432 p. (in Russian).

6. Perelman, V.I. Kratkiy spravochnik khimika. [Chemist's quick reference book] Moscow; Leningrad: Khimiya, 1964, 620 p. (in Russian).

7. Petrunin, I.E., ed. Spravochnik po payke. [Reference book in soldering.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 576 p. (in Russian).

8. Kotelnitskaya, L.I., Demidova, N.N. Raschet radial'nykh s effektivnoy rabotoy na smazke s rasplavom v turbulentnom rezhime. [Analysis of radials with effective work on lubrication with melt in turbulent mode.] Vestnik RGUPS, 2002, no. 2, pp. 18–23 (in Russian).

9. Prikhodko, V.M., Kotelnitskaya, L.I. Matematicheskaya model' gidrodinamicheskoy smazki pri plavlenii opornoy poverkhnosti radial'nogo podshipnika. [A mathematical model of hydrodynamic lubrication when the radial bearing surface melts.] Friction and wear, 2001, vol. 22, no. 6, pp. 606–608 (in Russian).

10. Akhverdiev, K.S., Kotelnitskaya, L.I. Ob odnom reshenii zadachi o gidrodinamicheskoy smazke zhidkost'yu, obrazuyushcheysya pri plavlenii napravlyayushchey, pri nalichii prinuditel'noy smazki. [On a problem solution of hydrodynamic fluid lubrication formed under guide melting in the presence of forced lubrication.] Vestnik of DSTU, 2002, vol. 2, no. 2 (12), pp. 99–103 (in Russian).

11. Akhverdiev, K.S., Zhurba, I.A. Ustanovivsheesya dvizhenie vyazkouprugoy zhidkosti mezhdu naklonnym polzunom i napravlyayushchey s uchetom sil inertsii smazochnoy kompozitsii. [Steady state motion of a viscoelastic liquid between a tilt slider and a guide consistent with the lubricant inertia forces.] Friction and wear, 2004, vol. 25, no. 6, pp. 567–576 (in Russian).

12. Mukutadze, M.A. Razrabotka sistemy raschetnykh modeley podshipnikov skol'zheniya na osnove razvitiya gidrodinamicheskoy i reodinamicheskoy teorii smazki : dis. … d-ra tekhn. nauk. [System engineering of sliding bearings design models based on development of hydrodynamic and rheodynamic theory of lubrication: Dr.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 2015, pp. 363–383 (in Russian).

13. Akhverdiev, K.S., Mukutadze, M.A., Mukutadze, A.M. Radial bearing with porous barrel. Proceedings of Academic World: International Conference. San Francisco: Institute of Research and Journals, 2016, pp. 28—31.

14. Akhverdiev, K.S. Analytical method for prognosis of values of micropolar lubrication criteria providing stable operation of radial sliding bearing. Journal of Friction and Wear, 2008, vol. 29, no. 2, pp. 184–191.

Поступила в редакцию 14.06.2017
Сдана в редакцию 14.06.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 14.06.2017
Submitted 14.06.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Ахвердиев Камил Самедович,
заведующий кафедрой «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5062-2612
vm@rgups.ru

Лагунова Елена Олеговна,
доцент кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org./0000-0002-2761-8068
lagunova@trambler.ru

Василенко Владимир Владимирович,
аспирант кафедры «Физика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2),
ORCID : http://orcid.org/0000-0001-6096-4870
vvv_voen@rgups.ru

Authors:

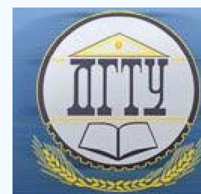
Akhverdiev, Kamil S.,
head of the Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5062-2612
vm@rgups.ru

Lagunova, Elena O.,
associate professor of the Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org./0000-0002-2761-8068
lagunova@trambler.ru

Vasilenko, Vladimir V.,
postgraduate student of the Physics Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6096-4870
vvv_voen@rgups.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.01 10.23947/1992-5980-2017-17-3-38-45

Обеспечение надежности технологических процессов вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей в среде стальных шаров*

М. А. Тамаркин[1], Э. Э. Тищенко[2], А. В. Гордиенко[3], Р. В. Гребенкин[4]**

[1, 2, 3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Reliability control of final vibration strengthening of part processing in steel balls medium***

M. A. Tamarkin[1], E. E. Tishchenko[2], A. V. Gordiyenko[3], R. V. Grebenkin[4]**

[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье представлены результаты исследований процесса вибрационной обработки деталей в среде стальных шаров. Выявлены технологические возможности обработки. Рассмотрено понятие надежности технологического процесса. Выявлены факторы, оказывающие влияние на выходные параметры объекта управления (технологического процесса) с точки зрения обеспечения его надежности, и показатели, с помощью которых можно оценить надежность технологического процесса.

Материалы и методы. В качестве объекта для исследования надежности выбран технологический процесс вибрационной отделочно-упрочняющей обработки в среде стальных шаров, который может осуществляться на операциях упрочнения и отделки деталей, скругления острых кромок, подготовки деталей под покрытия (гальванические, лакокрасочные, резиновые, клеевые и др.). Использовались образцы из различных материалов, применяемых в машино- и приборостроении.

Результаты исследования. Получен комплекс моделей формирования показателей надежности технологического процесса, позволяющих обеспечить повышение эффективности обработки и достижение заданной величины и стабильности параметров качества обрабатываемой детали. Установлены зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации, времени обработки. Проведен комплекс экспериментальных исследований, результаты которых подтверждают адекватность теоретических зависимостей.

Обсуждение и заключения. Пользуясь комплексом полученных моделей, можно рассчитать величину показателей точности на стадии технологического проектирования, что позволит прогнозировать надежность технологического процесса, принятого к производству.

Introduction. The research results of the vibration part processing in the steel balls medium are provided. Technological capabilities of the treatment are identified. The concept of process reliability is considered. Factors affecting the output parameters of a (process) control object from the point of view of its reliability, and indicators for estimating the process reliability are determined.

Materials and Methods. As an object for the reliability research, the vibration finishing-strengthening processing in the steel balls medium is selected. This process can be performed on the part hardening and finishing operations, peening, and coating (galvanic, paint, rubber, adhesive, etc.) preparation of parts. Samples from various materials applied in machine industry and instrument-making are used.

Research Results. A set of models for forming process reliability indices that allow providing increase in efficiency and reaching the specified value and stability of quality parameters of the processed part is obtained. Dependences for the determination of arithmetic average surface roughness, hardening depth, deformation ratio, and cutting time, are determined. A set of pilot studies which results confirm adequacy of the theoretical dependences is carried out.

Discussions and Conclusions. A set of the obtained models can help to calculate the accuracy factor value at the stage of process design that will allow predicting reliability of the process accepted for production.

Ключевые слова: вибрационная отделочно-упрочняющая обработка деталей, надежность технологического процесса, шероховатость поверхности, глубина упрочнения, степень деформации, время обработки.

Keywords: final vibration strengthening part processing, process reliability, surface roughness, hardening depth, deformation ratio, processing time.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: tehn_rostov@mail.ru, lina_tishenko@mail.ru, roman-viktorovich@yandex.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Образец для цитирования: Тамаркин, М. А. Обеспечение надежности технологических процессов вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей в среде стальных шаров / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. В. Гордиенко, Р. В. Гребенкин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 38–45.

For citation: M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, A.V. Gordiyenko, R.V. Grebenkin. Reliability control of final vibration strengthening of part processing in steel balls medium. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 38–45.

Введение. В современном производстве вопросы обеспечения надежности технологических процессов приобретают все большее значение. Стремление обеспечить требуемый уровень качества продукции и высокую производительность лежит, как правило, в основе разработки любого современного технологического процесса. При этом повышение производительности технологического процесса может привести к снижению качества, или, наоборот, более высокое качество может быть получено за счет низкой производительности. Надежность технологического процесса должна обеспечиваться как по качественным, так и по количественным показателям [1–8].

Под надежностью технологического процесса (ТП) понимают его свойство обеспечивать требуемые точность и качество детали, получаемые обработкой заготовки на одном или на нескольких этапах при условии сохранения на них промежуточных технологических параметров точности и качества в установленных пределах. Согласно ГОСТ 27.202-83 [2], при контроле ТП по рассеянию размеров после обработки поверхности детали для определения его надежности определяют значения показателей точности.

При этом надежность оценивается только по уровням тех показателей и параметров качества продукции, которые непосредственно зависят от технологии изготовления. В процессе анализа надежности следует исходить из заданных показателей качества готового изделия и номинальных значений, которые заранее прописаны в конструкторской документации. Необходимо без рассмотрения технического уровня самих изделий оценить, насколько процесс изготовления обеспечивает соблюдение установленных требований. Несмотря на то, что продукция при реализации такого технологического процесса может быть низкого качества или быстро устаревать морально, сам технологический процесс может обладать высокой надежностью.

Показатели, которыми оценивается надежность технологического процесса, являются универсальными. Безотказность — показатель надежности, обеспечение которого наиболее значимо при разработке технологического процесса. Безотказностью процесса называется его свойство сохранять работоспособность в течение рассматриваемого периода или до выполнения определенного объема работы без вынужденных перерывов (например, на ремонт).

Организация эффективной системы по контролю и управлению качеством процесса сводит отказы к минимуму. Возникновение отказов, связанных именно с технологией, особенно при освоении новых образцов машин, происходит зачастую потому, что параметры технологического процесса близки к предельным, а уровень технологии уже не соответствует возросшим требованиям к изделию и соответствующий запас надежности своевременно не создан. При этом качество готовой продукции напрямую связано с качеством технологического процесса, который своевременно должен быть адаптирован к возросшим требованиям к изготавливаемой продукции. Следовательно, чтобы улучшить качество продукции, следует повысить требования к оборудованию, методам контроля и организации самого процесса. К примеру, при большей сложности и точности изделий растет значение допусков не только на точность размеров, но и на точность формы, взаимное положение отдельных поверхностей.

Основная часть. Наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на выходные параметры объекта управления (технологического процесса) с точки зрения обеспечения его надежности, являются:
— факторы, связанные с поступающей на обработку заготовкой (предел текучести, жесткость, твердость, коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности, соответствие материала заготовки материалу, указанному в техническом задании);
— технологические режимы обработки (объем загрузки рабочей камеры, амплитуда и частота колебаний камеры, объем подаваемой технологической жидкости);
— характеристики рабочей среды (диаметры шаров, масса шаров);
— человеческий фактор.

Для анализа надежности технологического процесса, согласно [2], используются коэффициенты надежности. При контроле технологических процессов по количественному признаку определены следующие значения показателей точности.

1. Коэффициент точности (по контролируемому параметру):

$$K_T = \frac{\omega^P}{T},$$

где ω^P — поле рассеяния, или разность максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленное (контрольное) время; T — допуск на контролируемый параметр.

При нормальном законе распределения контролируемого параметра

$$\omega^P = 6\sigma ,$$

где σ — среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра.

Процесс или его элемент стабильно обеспечивают точность контролируемого параметра, если

$$K_T \le K_{TO} \le 1 ,$$

где $K_{\text{то}}$ — нормативное (предельное, технически обоснованное) значение K_T.

2. Коэффициент мгновенного рассеивания (по контролируемому параметру):

$$K_\rho(\tau) = \frac{\omega^P(\tau)}{T} ,$$

где $\omega^P(\tau)$ — поле рассеяния контролируемого параметра в момент времени τ.

3. Коэффициент смещения (контролируемого параметра):

$$K_{см}(\tau) = \frac{\overline{\Delta}(\tau)}{T} ,$$

где $\overline{\Delta}(\tau)$ — среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска в момент времени τ.

Здесь

$$\overline{\Delta}(\tau) = \left| \overline{y}(\tau) - y_0 \right| ,$$

где $\overline{y}(\tau)$ — среднее значение контролируемого параметра; y_0 — значение параметра, соответствующее середине поля допуска (при симметричном поле допуска значение y_0 совпадает с номинальным значением параметра $y_{\text{ном}}$).

4. Коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру):

$$K_з(\tau) = 0,5 - K_{см}(\tau) - 0,5K_\rho(\tau).$$

При контроле точности должно выполняться условие $K_з(\tau) > 0$.

В качестве объекта для исследования надежности выбран технологический процесс вибрационной отделочно-упрочняющей обработки (ВиОУО) в среде стальных шаров. ВиОУО является одним из наиболее перспективных и высокопроизводительных методов обработки деталей машин и приборов. Он обладает большими технологическими возможностями, достаточно легко подвергается механизации и автоматизации. Такой метод обработки может применяться на операциях упрочнения и отделки деталей, скругления острых кромок, подготовки деталей под покрытия (гальванические, лакокрасочные, резиновые, клеевые и др.).

Для расчета параметров надежности исследуемых технологических процессов отделочно-упрочняющей вибрационной обработки необходимо прогнозировать рассеяние показателей качества изготавливаемых деталей. Для этого нужно получить теоретические зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости, глубины упрочнения и степени деформации [9].

Выполнен комплекс теоретических исследований формирования шероховатости обработанной поверхности при ВиОУО. При расчетах сделаны следующие основные допущения: шар, двигаясь под некоторым углом α к обрабатываемой поверхности, внедряется и проходит некоторое расстояние по этой поверхности. Образуется отпечаток, который представляет собой часть эллипсоида. При наложении единичных следов формируется профиль шероховатости поверхности. Для упрощения схемы взаимодействия принято, что диаметры всех шаров одинаковы. Кроме того, учитывается только скольжение шара по поверхности при внедрении, исключая возможное перекатывание. Анализируются только средние вероятностные значения различных параметров единичного взаимодействия.

Скорость соударения шара с поверхностью обрабатываемой детали можно определить по зависимости

$$V_{эф} = k_{эф} A \omega ,$$

где A — амплитуда колебаний рабочей камеры; ω — частота колебаний рабочей камеры; $k_{эф}$ — коэффициент, учитывающий влияние соседних шаров при ВиОУО.

Максимальная глубина внедрения шаров в поверхность детали определяется следующим образом:

$$h_{\max} = 2k_{эф} A \omega R \sin\alpha \sqrt{\frac{\rho_ш}{3k_s c \sigma_T}} ,$$

где R — радиус шаров; $\rho_ш$ — плотность материала шара; σ_T — предел текучести материала детали; c — коэффициент несущей способности контактной поверхности; k_s — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости

поверхности детали на площадь фактического контакта.

Проекция пятна контакта шара с поверхностью детали на плоскость представляет собой эллипс с большой и малой полуосями *a* и *b* соответственно, величины которых можно определить по зависимостям:

$$b=\sqrt{R^2-\left(R-h_{\max}\right)^2}\ ,$$

$$a=\frac{\pi}{2}\left(ctg\alpha-f\right)h_{\max}+b\ ,$$

где *f* — коэффициент трения при скольжении шара по материалу обрабатываемой детали.

Среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости поверхности при ВиОУО не изменяется в течение длительного времени при постоянных технологических режимах. Его можно определить как

$$Ra_{уст.}=0,002\sqrt{\frac{h_{\max}l_{ед}ab}{R^2}}\ ,$$

где $l_{ед}$ — единичная длина, введенная для сохранения размерности.

При решении технологических задач ВиОУО важное значение имеет аналитический расчет ожидаемого значения глубины упрочнения $h_н$ и степени деформации ε. От толщины упрочненного слоя зависят многие эксплуатационные свойства деталей (усталостная прочность, долговечность и др.). Величина $h_н$ определяет зону поверхностного слоя, в которой имеются остаточная деформация зерен и дислокаций кристаллической решетки. Они образованы в результате приложения внешней нагрузки. Аналитическое определение глубины упрочнения и степени деформации в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей и рассматривается в работах многих исследователей процесса [5, 9, 10]. При проведении собственных исследований будем учитывать, что с переходом от статического нагружения к ударному возрастает сопротивление материала вдавливанию в него инденторов, т. е. возрастает уровень твердости материала, вследствие чего динамическая твердость $HD_д$ оказывается больше статической *HD*.

Количественной мерой возрастания твердости при динамическом нагружении служит динамический коэффициент твердости η [11], который представляет собой отношение $\eta=\frac{HD_д}{HD}$.

С достаточной для практики точностью зависимость динамического коэффициента твердости от скорости внедрения индентора при обработке стали (как для случая контакта сферы с плоскостью, так и для тел произвольной формы и кривизны) получена в работе Ю. И. Сидякина [11]:

$$\eta=0,5\left(1-\frac{137V_0}{HD}+\sqrt{1+\frac{2250V_0}{HD}}\right),$$

где HD — статическая твердость, *Vo* — начальная скорость удара.

Это выражение позволяет вычислять динамическую твердость сталей по их статической твердости и начальной скорости удара.

На практике часто необходим перерасчет одних чисел твердости в другие. Этот перерасчет производятся исключительно на основе эмпирических зависимостей, которые не полностью описывают внутренние связи между различными числами твердости. В работе [11] автор предлагает использовать одну из наиболее часто используемых зависимостей для перевода твердости по Бринеллю в динамическую твердость:

$$HB=0,2HD^{0,89}\ .$$

С учетом вышеприведенной зависимости и коэффициента твердости, а также условия пластичности Генки — Мизеса [9, 11] при описании пластически деформированной области, распространяющейся на некоторую глубину вокруг остаточной вмятины (пластического отпечатка), получены следующие формулы для расчета глубины упрочнения и степени деформации:

$$h_н=3,8R\left[1-\frac{1}{2}\left(1-\frac{b}{a}\right)^4\right]\sqrt{k_{эф}A\omega\sin\alpha}\sqrt[4]{\frac{\rho_ш}{k_c c\sigma_T}}\ ,$$

$$\varepsilon=0,025\sqrt{k_{эф}A\omega}\sqrt[4]{\frac{\rho_ш}{\eta HB^{1,12}}}\ .$$

Определено время достижения заданной шероховатости при ВиОУО:

$$t_F = \frac{4h_{\max} F R^2}{V_S f_в},$$

где F — число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности; V_S — объем деформируемого металла при единичном взаимодействии шара с обрабатываемой поверхностью.

Для проверки достоверности предложенных теоретических моделей формирования шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации при ВиОУО проведены комплексные экспериментальные исследования. Рассмотрено влияние амплитуды рабочей камеры, размеров среды и твердости материала детали по Бринеллю на формирование шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации при ВиОУО. Приведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований позволяет установить адекватность предложенных теоретических зависимостей. Разница между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 20 %.

Пользуясь комплексом моделей процесса ОУ ЦРО можно рассчитать величину показателей точности процесса на стадии технологического проектирования, что позволит прогнозировать надежность принятого к производству технологического процесса.

При проведении исследований авторами установлено, что надежность технологического процесса определяется величиной допуска на контролируемый параметр качества обработки. Проведено компьютерное моделирование влияния величины допуска контролируемого параметра на надежность технологического процесса. Выполнены расчеты параметров надежности при возможном разбросе амплитуды и частоты колебаний рабочей камеры в пределах 5, 10 и 15 процентов при обработке деталей из различных материалов (сталей и цветных сплавов). Некоторые результаты исследований представлены на рис. 1–3.

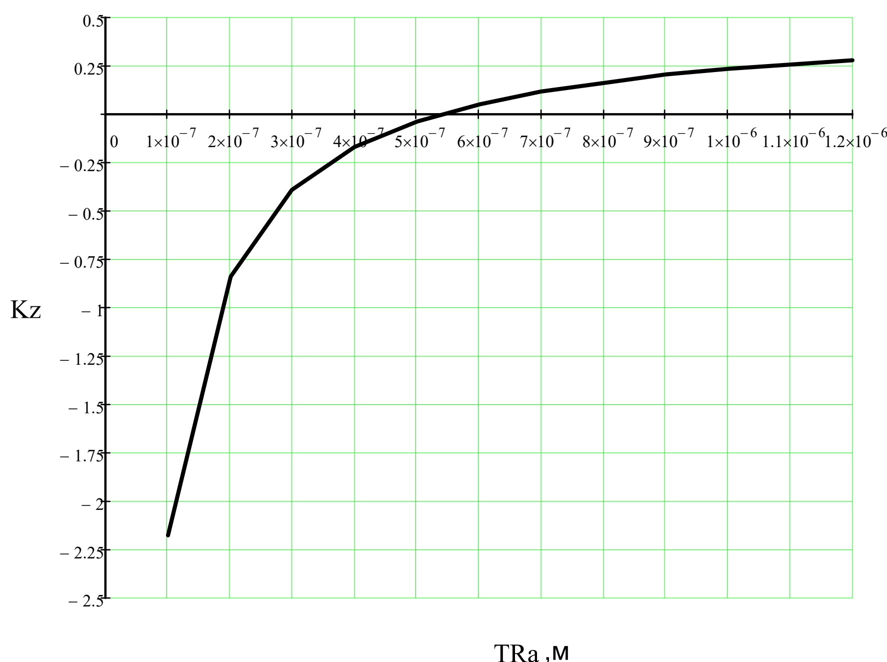


Рис. 1. Влияние величины допуска на надежность технологического процесса. Контролируемый параметр — шероховатость поверхности Ra: диапазон изменения допуска 0,1–1,2 мкм с шагом 0,1 мкм; диаметр шарика — 10 мм; амплитуда — 2,5 мм; частота — 26,7 Гц; материал — сталь 20; разброс — 5 %

Fig. 1. Effect of tolerance level on process reliability. Controlled parameter — surface roughness Ra: tolerance turndown 0,1–1,2 µm in 0,1 µm increment; ball diameter is 10 mm; amplitude — 2,5 mm; frequency — 26,7 Hz; material — steel 20; spread — 5%

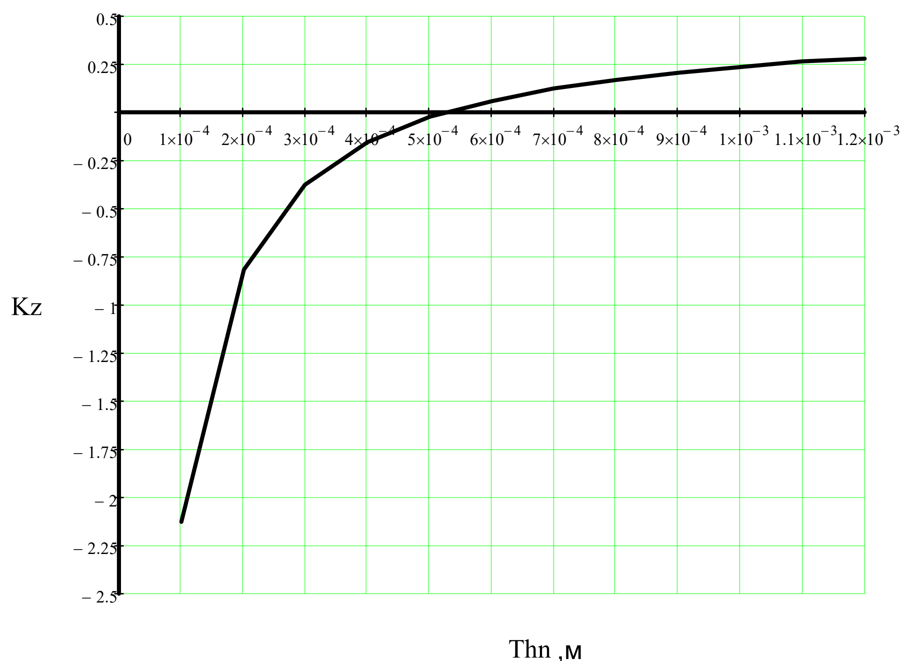


Рис. 2. Влияние величины допуска на надежность технологического процесса. Контролируемый параметр — глубина упрочненного слоя $h_н$: диапазон изменения допуска 0,1–1,2 мм с шагом 0,1 мм; диаметр шарика — 8 мм; амплитуда — 2,5 мм; частота — 26,7 Гц; материал детали — сталь 45; разброс 10 %

Fig. 2. Effect of tolerance level on process reliability. Controlled parameter – hardened layer depth $h_н$: tolerance turndown 0,1–1,2 mm in 0,1 mm increment; ball diameter is 8 mm; amplitude — 2,5 mm; frequency — 26,7 Hz; part material — steel 45; spread — 10%

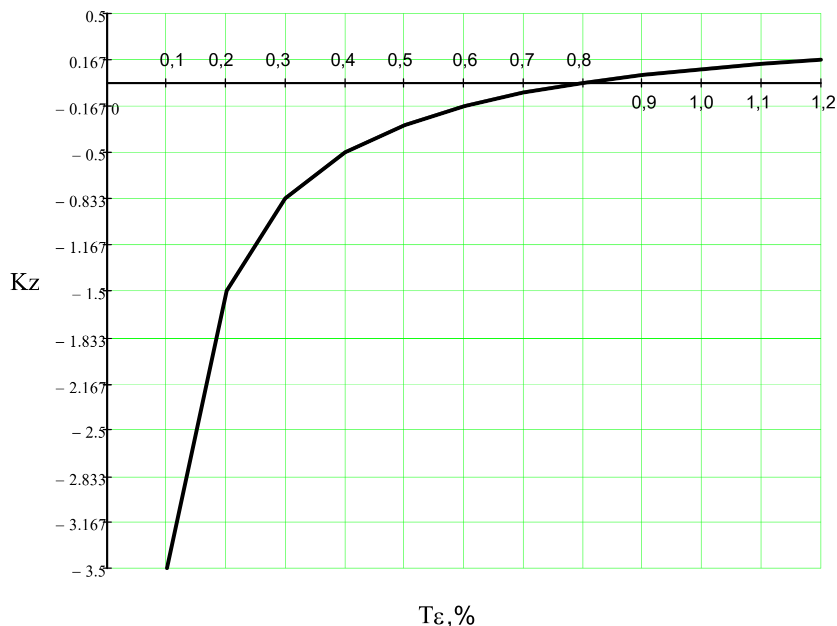


Рис. 3. Влияние величины допуска на надежность технологического процесса. Контролируемый параметр — степень деформации ε: диапазон изменения допуска — 0,1–1,2 % с шагом 0,1 %; диаметр шарика — 10 мм; амплитуда — 2,5 мм; частота — 26,7 Гц; материал детали — сталь 45; разброс — 10 %

Fig. 3. Effect of tolerance level on process reliability. Controlled parameter – deformation ratio ε: tolerance turndown – 0,1–1,2% in 0,1% increment; ball diameter — 10 mm; amplitude — 2,5 mm; frequency — 26.7 Hz; part material — steel 45; spread — 10%

Заключение. Пользуясь комплексом полученных для ВиОУО моделей, можно рассчитать величину показателей точности на стадии технологического проектирования, что позволит прогнозировать надежность технологического процесса, принятого к производству. Показатели точности процесса рассчитываются по формулам, полученным выше. Вводятся поля рассеяния исходных величин (технологических режимов и физико-механических свойств материала детали). Далее определяются поля рассеяния значений контролируемого параметра, среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска. Рассчитывается значение коэффициента запаса

точности. В случае выполнения условия $K_3 > 0$ рассчитывается время обработки для каждого варианта сочетания технологических параметров и выбирается вариант, обеспечивающий минимальное время обработки, которое и считается рациональным.

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать вывод, что технологический процесс ВиОУО обеспечивает получение требуемых параметров качества поверхности детали в ходе обработки в пределах величины поля допуска в определенном интервале изменения технологических режимов и характеристик рабочих сред.

Библиографический список

1. Корольков, Ю. В. Повышение надежности технологического процесса центробежно-ротационной обработки в среде абразива : дис. … канд. техн. наук / Ю. В. Корольков. — Ростов-на-Дону, 2011. — 167 с.
2. ГОСТ 27.202-83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности / Государственный комитет СССР по стандартам. — Москва : Издательство стандартов. — 51 с.
3. Рыжкин, А. А. Основы теории надежности / А. А. Рыжкин, Б. Н. Слюсарь, К. Г. Шучев. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2002. — 182 с.
4. Андросов, А. А. Надежность технических систем / А. А. Андросов. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2000. — 169 с.
5. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. — Москва : Машиностроение, 1986. — 224 с.
6. Propagation of a pressure step in a granular material: The role of wall friction / T. Boutreaux [et al.] // Physical Review E. — 1997. — Vol. 55, № 5b. — P. 57–59.
7. Jaeger, M. Granular solids, liquids, and gases / M. Jaeger, S.-R. Nagel, R.-P. Behringer // Reviews of Modern Physics. — 1996. — Vol. 68. — P. 1259–1273.
8. Impact Damper with Granular Materials for Multibody System / I. Yokomithi [et al.] // Journal of Pressure Vessel Technology. — 1996. — Vol. 11. — P. 160–166.
9. Тамаркин, М. А. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, В. Г. Лебеденко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2009. — Т. 9, № 3. — С. 213–223.
10. Tamarkin, M. A. Surface-layer quality in shot treatment / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, V. G. Lebedenko // Russian Engineering Research. — 2010. — Vol. 30, № 2. — P. 144–148.
11. Сидякин, Ю. И. Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием : автореф. … дис. докт. техн. наук / Ю. И. Сидякин. — Москва, 2002. — 34 с.

References

1. Korolkov, Y.V. Povyshenie nadezhnosti tekhnologicheskogo protsessa tsentrobezhno-rotatsionnoy obrabotki v srede abraziva: dis. … kand. tekhn. nauk. [Increase in reliability of centrifugal-rotary processing in abrasive environment: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 2011, 167 p. (in Russian).
2. GOST 27.202-83. Nadezhnost' v tekhnike. Tekhnologicheskie sistemy. Tekhniche-skie trebovaniya k metodam otsenki nadezhnosti po parametram proizvoditel'nosti. [GOST 27.202-83. Reliability in technique. Technological systems. Methods of reliability evaluation by parameters of product quality.] USSR State Standards Committee. Moscow: Standartinform, 51 p. (in Russian).
3. Ryzhkin, A.A., Slyusar, B.N., Shuchev, K.G. Osnovy teorii nadezhnosti. [Reliability theory fundamentals.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2002, 182 p. (in Russian).
4. Androsov, A.A. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem. [Reliability of engineering systems.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2000, 169 p. (in Russian).
5. Drozd, M.S., Matlin, M.M., Sidyakin, Y.I. Inzhenernye raschety uprugoplasticheskoy kontaktnoy deformatsii. [Engineering analysis of elastoplastic contact deformation.] Moscow: Mashinostroenie, 1986, 224 p. (in Russian).
6. Boutreaux, T., et al. Propagation of a pressure step in a granular material: The role of wall friction. Physical Review E. 1997, vol. 55, no. 5b, pp. 57–59.
7. Jaeger, M., Nagel, S.-R., Behringer, R.-P. Granular solids, liquids, and gases. Reviews of Modern Physics, 1996, vol. 68, pp. 1259–1273.
8. Yokomithi, I., et al. Impact Damper with Granular Materials for Multibody System. Journal of Pressure Vessel Technology, 1996, vol. 11, pp. 160–166.

9. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Lebedenko, V.G. Povyshenie kachestva poverkhnostnogo sloya detaley pri obrabotke poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem v gibkikh granulirovannykh sredakh. [Improvement of quality of the blanket of details at processing by superficial plastic deformation in the flexible granulated environments.] Vestnik of DSTU, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 213–223 (in Russian).

10. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Lebedenko, V.G. Surface-layer quality in shot treatment. Russian Engineering Research, 2010, vol. 30, no. 2, pp. 144–148.

11. Sidyakin, Y.I. Razrabotka metodov rascheta uprugoplasticheskikh kontaktnykh deformatsiy v protsessakh uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem : avtoref. … dis. dokt. tekhn. nauk. [Development of methods for calculating elastoplastic contact deformations in processes of parts hardening by surface plastic deformation: Dr.Sci. (Eng.) diss., author's abstract.] Moscow, 2002, 34 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 22.03.2017
Сдана в редакцию 29.03.2017
Запланирована в номер 03.04.2017

Received 22.03.2017
Submitted 29.03.2017
Scheduled in the issue 03.04.2017

Об авторах:

Тамаркин Михаил Аркадьевич,
заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9558-8625
tehn_rostov@mail.ru

Тищенко Элина Эдуардовна,
доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4439-5350
lina_tishenko@mail.ru

Гордиенко Александр Владимирович,
доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7624-0295
gordiernkoav@mail.ru

Гребёнкин Роман Викторович,
соискатель кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4439-5350
roman-viktorovich@yandex.ru

Authors:

Tamarkin, Mikhail A.
associate professor of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr..Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9558-8625
tehn_rostov@mail.ru

Tishchenko, Elina E.,
associate professor of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4439-5350
lina_tishenko@mail.ru

Gordienko, Alexander V.,
associate professor of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7624-0295
gordiernkoav@mail.ru

Grebenkin, Roman V.,
Ed.D. Candidate of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4439-5350
roman-viktorovich@yandex.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62.752, 621:534.833;888.6 10.23947/1992-5980-2017-17-3-46-59

Устройства для преобразования движения в структуре диады механической колебательной системы*

С. В. Елисеев[1], А. И. Орленко[2], Д. Х. Нгуен[3]**

[1,3] Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

[2] Красноярский институт железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения, Российская Федерация

Motion translation devices in dyad structure of mechanical oscillatory system***

S. V. Eliseev[1], A. I. Orlenko[2], D. H. Nguyen[3]**

[1,3] Irkutsk State Railway Transport Engineering University, Russian Federation

[2] Krasnoyarsk Institute of Rail Transport, Branch of Irkutsk State Transport Engineering University, Russian Federation

Введение. Рассматриваются возможности создания новых подходов в оценке динамических свойств механических колебательных систем. Цель исследований заключается в разработке метода построения математических моделей механических колебательных систем с несколькими степенями свободы, основанного на представлениях о системообразующих фундаментальных возможностях диад как структурных образований, определяющих особенности состояний исходной системы в целом.

Материалы и методы. Используются подходы и приемы структурного математического моделирования, в рамках которых механической колебательной системе сопоставляется эквивалентная в динамическом отношении структурная схема системы автоматического управления. Оценка динамических свойств и вводимых дополнительных связей основана на применении передаточных функций, амплитудно-частотных характеристик и технологий частотного анализа.

Результаты исследования. Доказаны возможности изменения динамических свойств систем путем введения дополнительных связей, реализующих преобразования состояний во взаимодействиях элементов на основе эффектов двойного дифференцирования. Показаны возможности изменений, которые могут быть инициированы устройствами для преобразования движения.

Обсуждение и заключения. Разработан метод построения математических моделей диад и технология оценки их динамических свойств. Предложены физически реализуемые схемы конструктивно-технических решений на основе устройств для преобразования движения.

Introduction. The possibilities of creating new approaches to the evaluation of the dynamic properties of mechanical oscillation systems are considered. The research objective is to develop a method for constructing mathematical models of mechanical oscillatory systems with several degrees of freedom based on the concepts of system-forming fundamental capabilities of dyads as certain structural formations that determine features of the states of the initial system as a whole.

Materials and Methods. Approaches and techniques of the structural mathematical modeling are used, within which a mechanically oscillating system is compared with a dynamically equivalent structural diagram of an automatic control system. Estimation of the dynamic properties and introduced additional couplings is based on the application of transfer functions, amplitude-frequency characteristics, and frequency analysis technologies.

Research Results. The changeability of the dynamic system properties through introducing additional constraints that realize the transformation of states in the interactions of elements on the basis of double differentiation effects is proved. The possibilities of changes that can be initiated by devices for converting motion are shown.

Discussion and Conclusions. A technique for building mathematical models of dyads, and a technology for estimating their dynamic properties are developed. Physically realizable schemes of the design engineering solutions based on motion translation devices are proposed.

Ключевые слова: диада, устройство для преобразования движения, структурная схема, передаточная функция.

Keywords: dyad, motion translation device, structural chart, transfer function.

Образец для цитирования: Елисеев, С. В. Устройства для преобразования движения в структуре диады механической колебательной системы / С. В. Елисеев, А. И. Орленко, Д. Х. Нгуен // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 46–59.

For citation: S. V. Eliseev, A. I. Orlenko, D. H. Nguyen. Motion translation devices in dyad structure of mechanical oscillatory system. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 46–59.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР (рег. номер АААА-А16-116112350117-7).

** E-mail: eliseev_s@inbox.ru, Orlenko_AI@krsk.irgups.ru, Huynhnd1987@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D (reg. no. АААА-А16-116112350117-7).

Введение. Вопросы о расширении элементной базы механических колебательных систем давно привлекают внимание и неоднократно рассматривались с позиций возможности развития обобщенных подходов в системах многофункционального назначения, что нашло отражение в работах по структурному математическому моделированию [1–3]. В последние годы наметился интерес к детализации представлений о принципах динамических аналогий и формах их реализации в теории цепей и в различных приложениях. Интерпретации механических колебательных систем на основе аппарата теории автоматического управления рассмотрены в работах, ориентированных на решение задач динамического синтеза виброзащитных систем [4–6], что инициирует внимание к поиску и детализации представлений о взаимодействиях типовых элементов. В частности, интерес представляет рассмотрение диад как типовых фундаменто-образующих структур линейных механических колебательных систем. Вместе с тем диады, как структуры, обладающие двумя степенями свободы, могут, в свою очередь, содержать не только упругие и массоинерционные элементы обычного вида, но и типовые элементы, реализующие функции преобразования движения [1, 3, 5]. В настоящей работе рассматриваются особенности динамических свойств диад в линейных механических колебательных системах цепного типа, содержащих в своем составе устройства для преобразования движения.

I. Общие положения. Постановка задачи исследования. Рассмотрим механическую линейную колебательную систему с двумя степенями свободы, продемонстрированную на рис. 1. На систему действуют гармонические внешние силы Q_1 и Q_2, приложенные непосредственно к массоинерционным элементам m_1 и m_2. В системе имеются упругие элементы с жесткостями k_1, k_2, k_3, а также устройство для преобразования движения с приведенной массой L [1, 5].

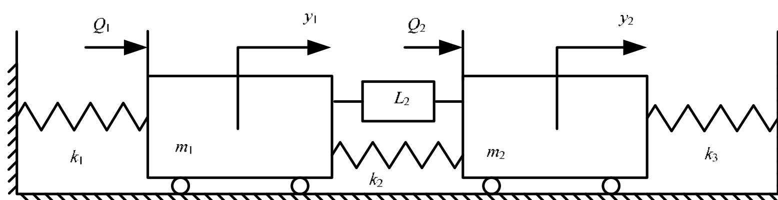


Рис. 1. Принципиальная схема механической колебательной системы, содержащей диаду (m_1, k_2, m_2, L)

Fig. 1. Block diagram of mechanical oscillatory system containing dyad (m_1, k_2, m_2, L)

Используя технологии структурного математического моделирования [3, 5], основанные на применении уравнений Лагранжа 2-го рода и последующих преобразований Лапласа, получим в качестве модели структурную схему эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления (рис. 2).

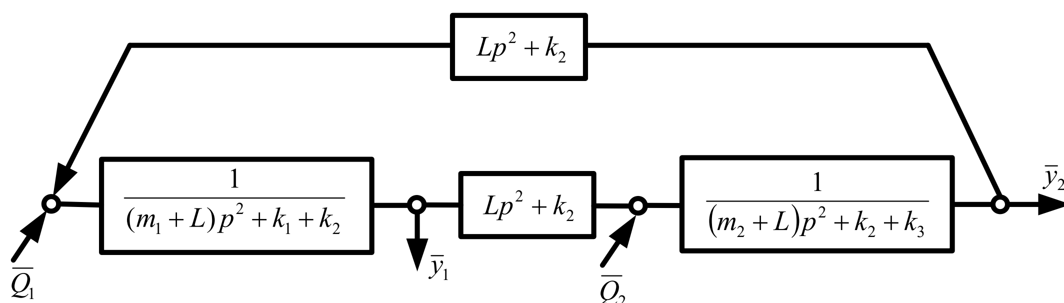


Рис. 2. Структурная схема системы с устройствами преобразования движения

Fig. 2. Structural diagram of system with motion translation devices

Рассматриваемая система обладает линейными свойствами и совершает малые колебания относительно положения статического равновесия. На рис. 2 приняты следующие обозначения: $p = j\omega$ — комплексная переменная; значок <–> соответствует изображению переменной по Лапласу. Понятие о приведенной массе L устройства для преобразования движения более подробно рассматривается в [7]. Отметим, что устройство для преобразования движения (УПД) может быть реализовано в различных конструктивно-технических формах, например, в виде рычажных, зубчатых или винтовых несамотормозящихся механизмов.

Используя структурную схему (рис. 2), можно получить передаточные функции исходной системы, полагая что $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ являются выходными сигналами, а внешние воздействия $\bar{Q}_1$, $\bar{Q}_2$ — входными. Принимая для упрощения, что $\bar{Q}_1 \neq 0$ ($\bar{Q}_2 = 0$), запишем передаточные функции:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{m_2 p^2 + Lp^2 + k_2 + k_3}{A(p)}; \quad (1)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1} = \frac{Lp^2 + k_2}{A(p)}; \quad (2)$$

где

$$A(p) = (m_1 p^2 + Lp^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + Lp^2 + k_2 + k_3) - (Lp^2 + k_2)^2 \quad (3)$$

— характеристическое частотное уравнение системы.

Кроме передаточных функций (1), (2) в рассмотрение вводится передаточная функция межпарциальных связей:

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{Lp^2 + k_2}{m_2 p^2 + Lp^2 + k_2 + k_3}. \quad (4)$$

В случае одновременного действия двух сил $\bar{Q}_1$ и $\bar{Q}_2$ возможно использование принципа суперпозиции [8]. Отметим, что простые формы преобразований реализуются в случаях, когда обе внешние силы имеют одну частоту и действуют синхронно.

Задача исследования заключается в разработке метода оценки динамических свойств диады с устройством для преобразования движения и использования динамических эффектов для режима прикладных задач динамики вибрационных технологических машин.

II. Диада и ее динамические свойства. Диада рассматривается как структурное образование из типовых элементов с передаточными функциями инерционных звеньев m_1, m_2, упругого звена k_2 и УПД. Отметим, что диада, как некоторое структурное образование, находится «в изоляции» от связей с опорными поверхностями ($k_1 = 0$, $k_3 = 0$). При этом не учитываются силы сопротивления со стороны опорной горизонтальной поверхности.

Структурная схема диады и некоторые формы её преобразований приведены на рис. 3, *а*, *б*, *в*.

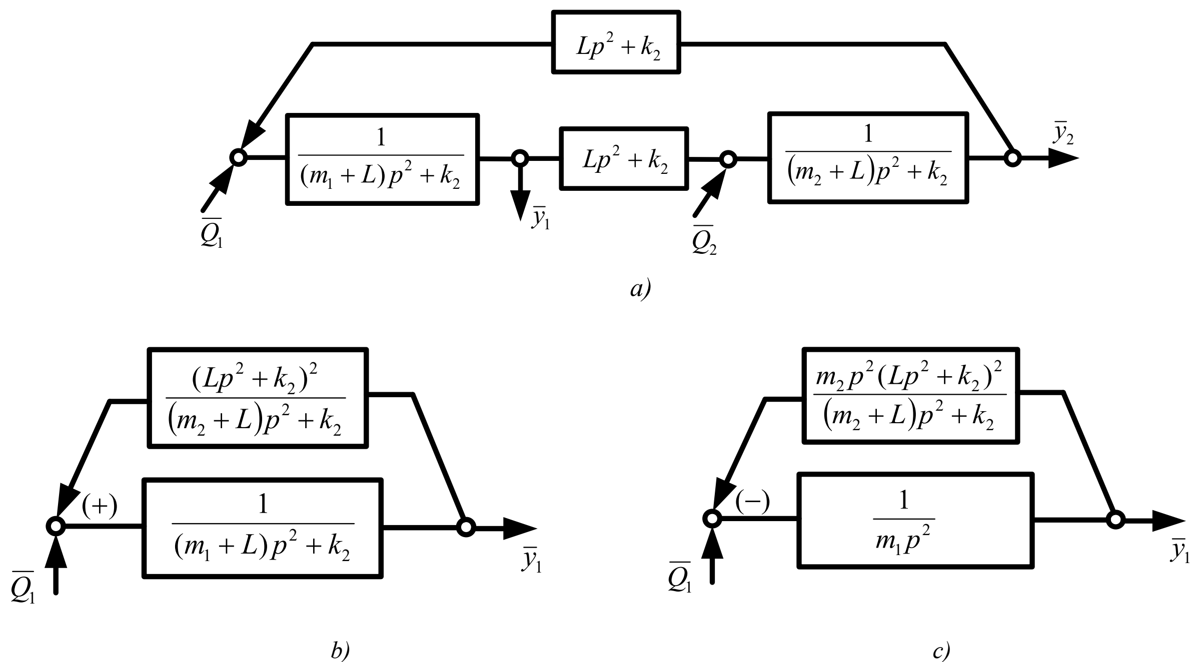


Рис. 3. Структурная схема диады: *a)* общий вид; *b)* структурная схема диады при исключении координат $\bar{y}_2$; *c)* структурная схема системы с выделением объекта вибрационной защиты m_1

Fig. 3. Dyad structural scheme: a) general form; b) dyad structure when excluding coordinates $\bar{y}_2$*; c) system structural scheme with allocation of vibration protection object* m_1

Передаточные функции диады на основе использования структурных схем (рис. 3, *а, б, в*) принимают вид:

$$W_{1\partial}(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{m_2 p^2 + Lp^2 + k_2}{A_1(p)}, \tag{5}$$

$$W_{2\partial}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1} = \frac{Lp^2 + k_2}{A_1(p)}, \tag{6}$$

$$W_{12\partial}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{Lp^2 + k_2}{m_2 p^2 + Lp^2 + k_2}, \tag{7}$$

где

$$A_1(p) = (m_1 p^2 + Lp^2 + k_2)(m_2 p^2 + Lp^2 + k_2) - (Lp^2 + k_2)^2 \tag{8}$$

— характеристическое частотное уравнение диады.

Выражение (8) может быть упрощено и приведено к виду:

$$p^4[m_1 m_2 + L(m_1 + m_2)] + p^2 k_2 (m_1 + m_2) = 0\,. \tag{9}$$

Из (9) следует, что система имеет циклическую координату. Это обеспечивает возможность рассмотрения диады в рамках прямолинейного поступательного перемещения как некоторого установившегося движения. При этом в соответствии с характеристическим уравнением будет верно равенство:

$$p^2\{[m_1 m_2 + L(m_1 + m_2)]p^2 + k_2(m_1 + m_2)\} = 0\,. \tag{10}$$

Из (9), (10) очевидно, что диада имеет одну частоту собственных колебаний $\omega_{1\partial}^2 = 0$. Вторая частота собственных колебаний диады определяется выражением:

$$\omega_{2\partial}^2 = \frac{k_2(m_1 + m_2)}{m_1 m_2 + L(m_1 + m_2)}\,. \tag{11}$$

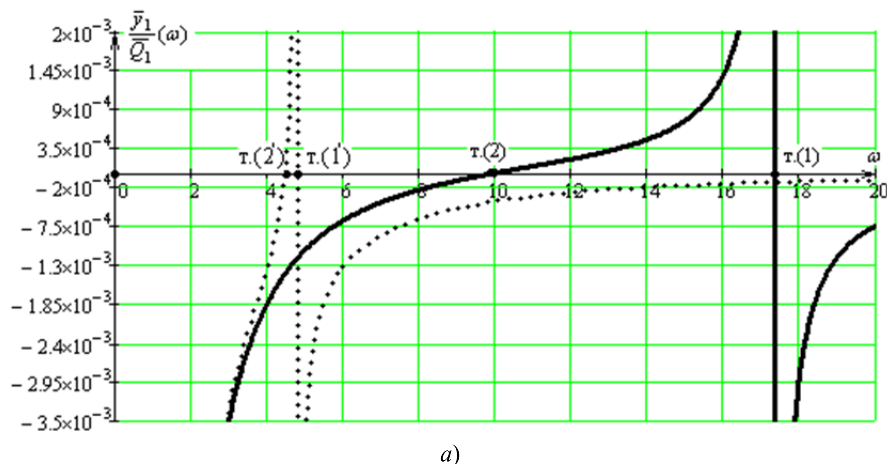
Если считать, что диада имеет без УПД приведенную массу

$$m_{пр} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \tag{12}$$

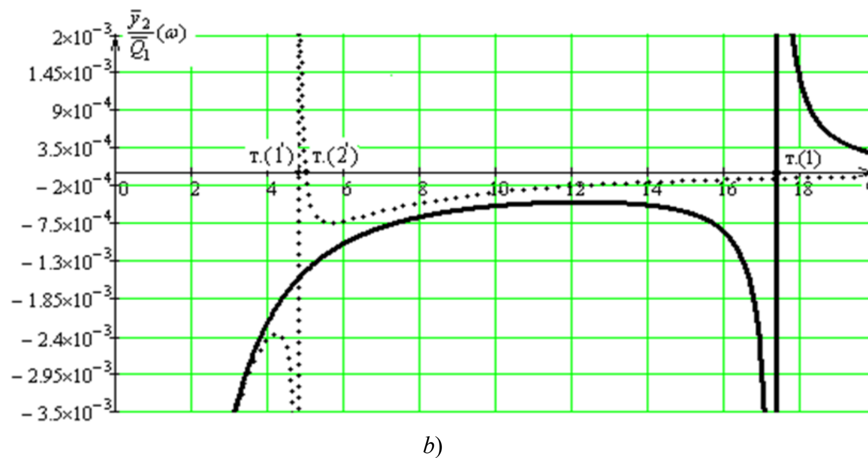
то с учетом (11) приведенная масса диады с УПД составит

$$m_{пр\ УПД} = m_{пр} + L\,. \tag{13}$$

Введение УПД в диаду уменьшает частоту собственных колебаний и вид амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) системы. На рис. 4, *а*, *б* приведены для сравнения АЧХ обычного вида и АЧХ с введенными УПД.



а)



b)

Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики диады:
а) АЧХ по координате y_1; *b*) АЧХ по координате y_2 (▬▬ — при $L = 0$, • • • • • • — при $L = 80$ кг)

Fig. 4. Dyad amplitude-frequency characteristics:
a) AFC in coordinate y_1; b) AFC in coordinate y_2 (▬▬ — at $L = 0$, • • • • • • — at $L = 80$ kg)

Для модельной задачи принято, что $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 20$ кг, $k_2 = 2000$ Н/м; приведенная масса L принимает два значения — $L = 0$ и $L = 80$ кг. Графики амплитудно-частотных характеристик $\frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1}(\omega)$ при $L = 0$ и $L = 80$ кг имеют отличия. Частоты собственных колебаний определяются положением точек (1) и (1') на оси абсцисс. При увеличении L значение частоты собственных колебаний уменьшается. При $L = 0$ график $\frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1}(\omega)$ пересекается с осью абсцисс в точке (2). При увеличении L эта точка перемещается в точку (2') (рис. 4, *а*). Характерно, что при увеличении L значения частоты динамического гашения колебаний и частоты собственных колебаний сближаются.

Графики АЧХ $\frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1}(\omega)$ (рис. 4, *б*) при $L = 0$ и $L = 80$ кг имеют характерные точки (1) и (1') на оси абсцисс, определяющие значения частот собственных колебаний. При $L = 0$ график $\frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1}(\omega)$ не имеет пересечений с осью абсцисс. Вместе с тем график $\frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1}(\omega)$ при $L = 80$ кг имеет пересечение с осью абсцисс в точке (2'), что свидетельствует о возникновении режима динамического гашения колебаний. Таким образом, параметр УПД, называемый приведенной массой L, может существенно изменять свойства диады и влиять на особенности движений системы в целом.

Отметим также, что точка (2') на рис. 4, *б* находится правее точки (1'), что свидетельствует о наличии особых режимов динамического взаимодействия элементов диады. Для диады без УПД АЧХ имеют вид, характерный для систем с одной степенью свободы. При этом полагается, что циклическое движение может на данном этапе исследования не рассматриваться.

С учетом УПД движение по координате $\bar{y}_1$ имеет частоту динамического гашения:

$$\omega^2_{1дин} = \frac{k_2}{m_2 + L}. \tag{14}$$

При этом частота собственных колебаний определяется выражением:

$$\omega^2_{соб\ д} = \frac{k_2}{L + \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}. \tag{15}$$

При частоте возмущения $\omega \to \infty$, система «запирается» и $W_{1\partial}(p)$ стремится к значению

$$\underset{p\to\infty}{W_{1\partial}(p)} = \frac{m_2 + L}{m_1 m_2 + L(m_1 + m_2)}. \tag{16}$$

По координате $\bar{y}_2$ режим динамического гашения колебаний определится выражением:

$$\omega^2_{2дин} = \frac{k_2}{L}; \tag{17}$$

соответственно на высоких частотах получим:

$$W_{\underset{p \to \infty}{2\partial}}(p) = \frac{L}{m_1 m_2 + L(m_1 + m_2)}. \qquad (18)$$

Таким образом, введение УПД привносит в диаду новые динамические эффекты. В частности, возможным становится динамическое гашение колебаний по координате y_2 (17), изменяются также значения парциальных частот диады и ее собственной частоты.

Передаточная функция межпарциальных связей с учетом УПД имеет вид, определяемый выражением (7), из которого следуют особенности динамических взаимодействий в межкоординатных связях $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$. Характерным является «обнуление» (7) или ситуация, когда $\bar{y}_2 = 0$, что не является возможным в диадах без устройств для преобразования движения. При $p \to 0$, соотношения амплитуд $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$, а при $p \to \infty$, $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{L}{m_2 + L}$, что можно рассматривать как форму проявления рычажных связей [9, 10].

Одновременное действие двух внешних силовых факторов не изменяет характеристическое частотное уравнение диады, но влияет на формы передаточных функций. Примем, что $\bar{Q}_2 = \alpha \bar{Q}_1$, тогда

$$W'_{1\partial}(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{(m_2 + L)p^2 + k_2 + \alpha(Lp^2 + k_2)}{A(p)}; \qquad (19)$$

$$W'_{2\partial}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1} = \frac{[(m_1 + L)p^2 + k_2]\alpha + Lp^2 + k_2}{A(p)}; \qquad (20)$$

$$W'_{12\partial}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{[(m_1 + L)p^2 + k_2]\alpha + Lp^2 + k_2}{(m_2 + L)p^2 + k_2 + \alpha(Lp^2 + k_2)}. \qquad (21)$$

При действии двух силовых факторов частоты собственных колебаний не изменяются. При этом изменяются частоты динамического гашения колебаний. По координате y_1 имеем:

$$\omega^2_{1дин\,\partial} = \frac{k_2(1+\alpha)}{m_2 + L(1+\alpha)}. \qquad (22)$$

По координате y_2 соответственно получим:

$$\omega^2_{2дин\,\partial} = \frac{k_2(1+\alpha)}{\alpha m_1 + L(1+\alpha)}. \qquad (23)$$

Отметим, что одновременное действие двух силовых факторов без сдвига по фазе можно рассматривать как способ изменения параметров приведенной жесткости системы, а также как способ изменения приведенных масс системы.

Для случая $\omega^2_{1дин\,\partial} = \omega^2_{2дин\,\partial}$ можно получить следующее уравнение связности:

$$\frac{k_2(1+\alpha)}{m_2 + L(1+\alpha)} = \frac{k_2(1+\alpha)}{\alpha m_1 + L(1+\alpha)}, \qquad (24)$$

откуда следует, что

$$\alpha = \frac{m_2}{m_1}. \qquad (25)$$

Если выполняется условие $\alpha = \frac{m_2}{m_1}$, то в системе реализуется особый динамический режим, при котором $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$, что соответствует движению объекта по двум координатам как «единое целое», то есть имеет место синфазное движение с одинаковыми амплитудами. Аналогичным образом могут быть получены и другие формы движений.

III. Использование энергетической функции. Если рассматривать диаду с УПД, то в системе координат y_1, y_2 её кинетическая и потенциальная энергии определяются выражениями:

$$T = \frac{1}{2} m_1 y_1^2 + \frac{1}{2} m_2 y_2^2 + \frac{1}{2} L(y_1 - y_2)^2, \qquad (26)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_2 (y_2 - y_1)^2. \qquad (27)$$

Частотная энергетическая функция может быть записана в виде:

$$\omega^2 = \frac{k_2(y_2 - y_1)^2}{(m_1 + L)y_1^2 + (m_2 + L)y_2^2 - 2Ly_1y_2}. \tag{28}$$

Введем понятие коэффициента связности координат:

$$i = y_2 / y_1, \tag{28'}$$

тогда

$$\omega^2 = \frac{k_2(i-1)^2}{m_1 + m_2 i^2 + L(i-1)^2}. \tag{29}$$

Рассмотрим, как влияет L на коэффициент формы связи координат i. Если УПД нет, то $L = 0$, а (29) примет вид:

$$\omega^2 = \frac{k_2(i-1)^2}{m_1 + m_2 i^2}. \tag{30}$$

Сравнивая с частотой собственных колебаний, определенной выше, получим:

$$\frac{k_2(i-1)^2}{m_1 + m_2 i^2} = \frac{k_2}{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}, \tag{31}$$

откуда следует, что

$$i = -\frac{m_1}{m_2}. \tag{32}$$

Если в диаду ввести УПД, то (31) трансформируется к виду:

$$\frac{k_2(i-1)^2}{m_1 + m_2 i^2 + L(i-1)^2} = \frac{k_2}{L + \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}, \tag{33}$$

откуда найдем, что значение i не зависит от L

$$i = -\frac{m_1}{m_2}. \tag{34}$$

На рис. 5 приведены результаты решения уравнения (29) по определению значений коэффициента связности i при различных значениях L (в модельной задаче приняты: m_1 = 10 кг, m_2 = 20 кг, k_2 = 2000 Н/м, L = 0, 10, 20, 50 кг).

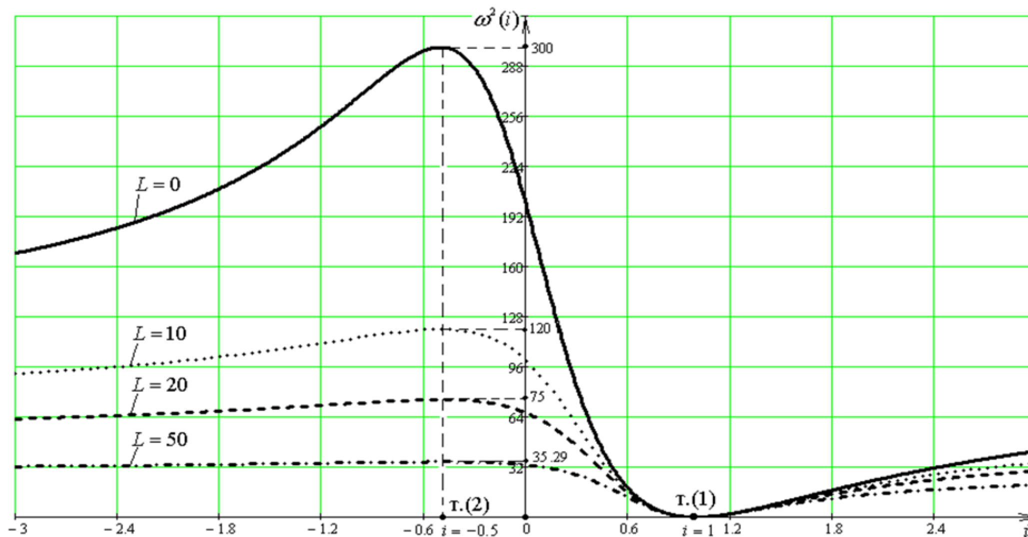


Рис. 5. Графики зависимости $\omega^2(i)$ при различных значениях L

Fig. 5. Dependency graphs $\omega^2(i)$ at different values of L

Из графиков на рис. 5 очевидно, что динамическое состояние диады не может находиться в форме колебаний, когда i = 1, поэтому все графики $\omega^2(i)$ при различных значениях L пересекаются в одной точке (1) на оси абсцисс (i = 1); при этом $\omega^2_{\text{соб}} = 0$ при всех значениях L. В данном случае это означает, что система имеет циклическую координату, характеризующую установившееся равномерное прямолинейное движение. Вместе с тем все графики с различными значениями L имеют экстремальные свойства при i = –0.5, что следует из выражения (34). Таким образом,

учет L (приведенная масса УПД) не приводит к изменению связности координат i, но при этом изменяются соответствующим образом значения частот собственных колебаний диады. При увеличении L частоты собственных колебаний диады уменьшаются (в пределе до нулевых значений), что связано с представлениями о получении очень низких частот при $L \to \infty$.

При $i = 0$, что соответствует $\frac{y_2}{y_1} = 1$, частоты собственных колебаний определяются вышеприведенным выражением (29). При $i \to +\infty$ из (29) следует, что

$$\omega^2_{i \to +\infty} = \frac{k_2}{m_2 + L}. \tag{35}$$

Отметим, что графики на рис. 5 при $i \to -\infty$ будут также стремиться к пределу $\frac{k_2}{m_2 + L}$, определяемому выражением (35), что соответствует парциальной частоте системы, состоящей из элементов m_2, k_2 и L.

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) диады при внешнем силовом возмущении к элементу m_1 приведены на рис. 6, *а*, *б*, *в*, *г*, где значение приведенной массы L изменяется в пределах $L = 0$ (рис. 6, *а*); $L = 10$ кг (рис. 6, *б*); $L = 20$ кг (рис. 6, *в*); $L = 50$ кг (рис. 6, *г*).

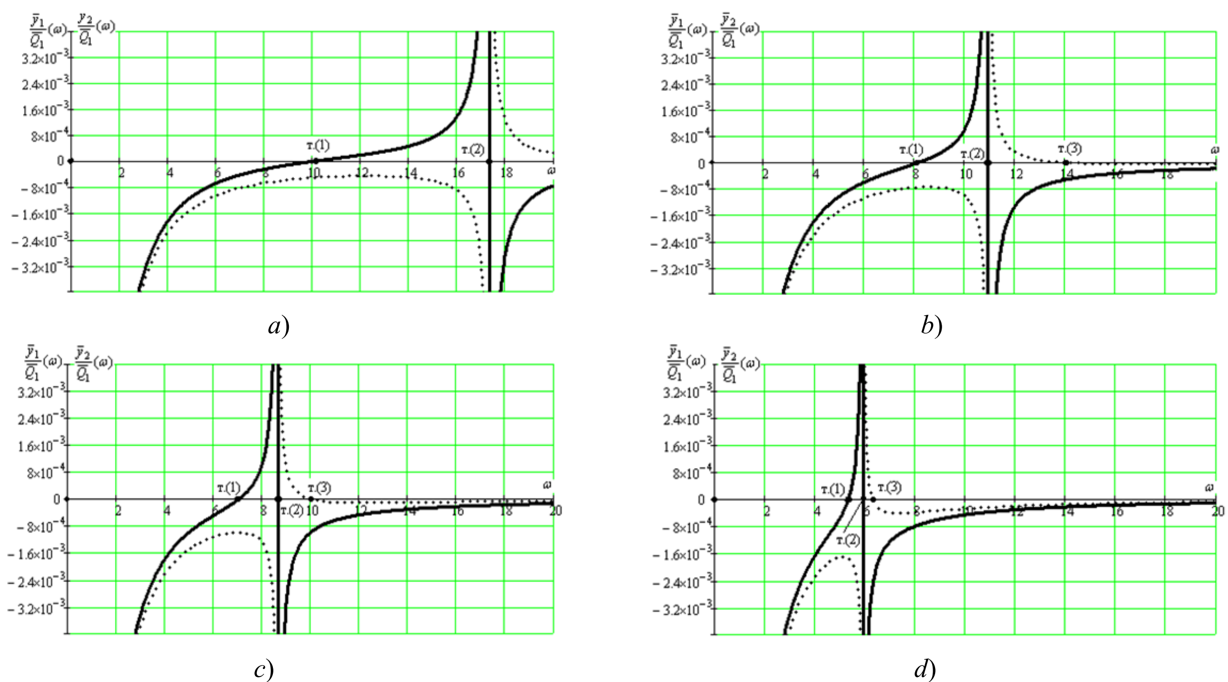


Рис. 6. Формы амплитудно-частотных характеристик диады при различных значениях приведенной массы устройства для преобразования движения L: *a)* $L = 0$; *b)* $L = 10$ кг; *c)* $L = 20$ кг; *d)* $L = 50$ кг

(сплошная линия (▬▬) соответствует графику зависимости по координате $\bar{y}_1$;

точечная линия (⋯⋯) соответствует по координате $\bar{y}_2$)

Fig. 6. Forms of dyad amplitude-frequency characteristics at different values of reduced mass of motion translation device L: a) L = 0; b) L = 10 kg*; c) L = 20* kg*; d) L = 50* kg

(solid line (▬▬) corresponds to dependency graph in coordinate $\bar{y}_1$;

dotted line (⋯⋯) corresponds to the one in coordinate $\bar{y}_2$)

АЧХ на рис. 6, *а* отображают динамические свойства без УПД при значениях параметров $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 20$ кг, $k_2 = 2000$ Н/м. В рассматриваемом случае система имеет одну частоту собственных колебаний ($\omega_2 \neq 0$), которая определяется точкой (2) на оси частот. В движениях по координате y_1 реализуется режим динамического гашения колебаний точки (1) на оси частот. Движение по координате y_2 происходит без режима динамического гашения колебаний, но АЧХ по координате y_1 имеет характерную форму с наличием минимального значения $\frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1}$.

Введение УПД с приведенными массами $L = 0$, 10, 20, 50 кг, что отображается на АЧХ, приведенных на рис. 6, приводит к появлению ряда новых динамических эффектов. Это связано с проявлениями режимов динамического гашения колебаний по координате y_1. При этом значение частоты собственных колебаний $\omega_2 \neq 0$ сдвигается в область более низких значений (точка (1) на рис. 6). На графиках АЧХ при $L \neq 0$, частоты динамического гашения ко-

лебаний (т. (3) на рис. 6, *б*, *в*, *г*) сдвигаются в сторону расположения точки (2), определяющей частоту собственных колебаний. Отметим, что сближение частот динамического гашения колебаний и собственных колебаний не является приемлемым для решения ряда задач динамики из-за возможностей проявления свойств, характерных для форм неустойчивых движений [11].

IV. Возможности физической реализации диады с использованием рычажных механизмов. Рассмотрим пример реализации диады в структуре динамического корректора колебаний в виброзащитной системе с двумя степенями свободы. На рис. 7 рассматривается механическая колебательная система с двумя степенями свободы как расчетная схема некоторого технического объекта массой m_2, который опирается на УПД рычажного типа. Такое устройство является стержнем, на одном конце которого размещен груз массой m_0 с возможностями изменения расстояния l_2 до точки вращения (точка В). В точке А (рис. 7) рычаг имеет связь в виде кинематической пары V класса (вращательная) с объектом защиты (АВ = l_1). Одновременно в точке В рычаг соединяется вращательной кинематической парой с промежуточной массой m_1. В системе используются четыре упругих элемента с жесткостями k_1, k_2, k_3 и k_4 (рис. 7). Движение системы описывается в системе координат y_0, y_1, y_2, связанной с неподвижным базисом; при этом положению объекта защиты m_2 соответствует координата y_2, положению рычага — y_0, промежуточной массы — y_1. В качестве внешнего возмущения рассматриваются гармонические колебания опорной поверхности $z(t)$. Система обладает линейными свойствами и совершает малые колебания относительно положения устойчивого статического равновесия.

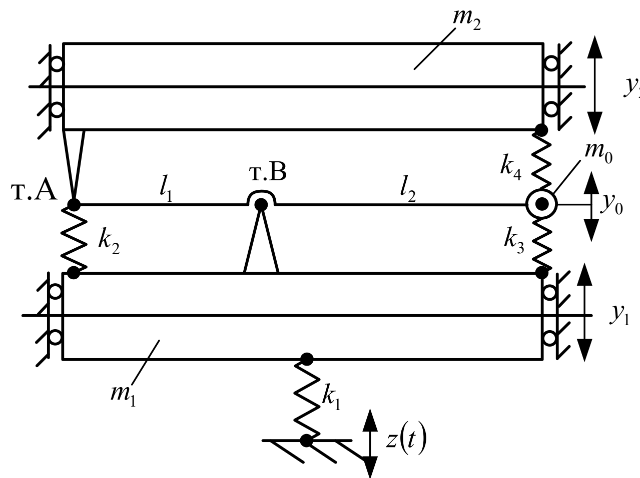


Рис. 7. Принципиальная схема виброзащитной системы технического объекта с УПД

Fig. 7. Block diagram of vibration protection system of technical object with motion translation device

В системе координат y_1 и y_2 выражения для кинетической и потенциальной энергий имеют вид:

$$\text{Т} = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}m_0\dot{y}_0^2, \tag{36}$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1\left(y_1 - z\right)^2 + \frac{1}{2}k_2\left(y_2 - y_1\right)^2 + \frac{1}{2}k_3\left(y_0 - y_1\right)^2 + \frac{1}{2}k_4\left(y_2 - y_0\right)^2. \tag{37}$$

С учетом кинематических соотношений сложного движения (36), (37) и введением коэффициента рычажной связи $i_p = \frac{l_2}{l_1}$ получим:

$$\text{Т} = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}m_0\left[\dot{y}_1\left(1 + i_p\right) - \dot{y}_2 i_p\right]^2, \tag{38}$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1\left(y_1 - z\right)^2 + \frac{1}{2}k_2(y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_3 i_p^2(y_1 - y_2)^2 + \frac{1}{2}k_4(1 + i_p)^2 \cdot (y_2 - y_1)^2. \tag{39}$$

В данном случае уравнения движения системы принимают вид:

$$\ddot{y}_1\left[m_1 + m_0\left(i_p + 1\right)^2\right] + y_1\begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 i_p^2 + \\ +k_4\left(i_p + 1\right)^2 \end{bmatrix} - \ddot{y}_2 m_0 i_p\left(i_p + 1\right) - y_2\begin{bmatrix} k_2 + k_3 i_p^2 + \\ +k_4\left(1 + i_p\right)^2 \end{bmatrix} = k_1 z(t), \tag{40}$$

$$\ddot{y}_2\left(m_2 + m_0 i_p^2\right) + y_2\begin{bmatrix} k_2 + k_3 i_p^2 + \\ +k_4\left(1 + i_p\right)^2 \end{bmatrix} - \ddot{y}_1 m_0 i_p\left(i_p + 1\right) - y_1\begin{bmatrix} k_2 + k_3 i_p^2 + \\ +k_4\left(1 + i_p\right)^2 \end{bmatrix} = 0. \tag{41}$$

На основании дифференциальных уравнений (40), (41) после преобразований Лапласа [3, 5] может быть построена структурная схема (рис. 8), которая имеет две координаты $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$. Что касается координаты $\bar{y}_0$, то она связана с $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ следующими соотношениями:

$$y_0 = y_1\left(1+i_p\right) - y_2 i_p. \tag{42}$$

Коэффициенты уравнений (40) и (41) в операторной форме приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Коэффициенты уравнений (40), (41) в координатах $\bar{y}_1$, $\bar{y}_2$

Coefficients of equations (40), (41) in coordinates $\bar{y}_1$, $\bar{y}_2$

a_{11}	a_{12}
$\left[m_1 + m_0\left(i_p+1\right)^2\right]p^2 + k_1 + k_2 + k_3 i_p^2 + k_4\left(i_p+1\right)^2$	$-[m_0 i_p\left(i_p+1\right)p^2 + k_2 + k_3 i_p^2 + k_4\left(1+i_p\right)^2]$
a_{21}	a_{22}
$-[m_0 i_p\left(i_p+1\right)p^2 + k_2 + k_3 i_p^2 + k_4\left(1+i_p\right)^2]$	$\left(m_2 + m_0 i_p^2\right)p^2 + k_2 + k_3 i_p^2 + k_4\left(1+i_p\right)^2$
$\bar{Q}_1$	$\bar{Q}_2$
$k_1 z(t)$	0

Примечание: $p = j\omega$ — комплексная переменная ($j = \sqrt{-1}$); символ <–> над переменной означает её изображение по Лапласу [3, 5].

Структурная схема системы в соответствии с данными таблицы 1 имеет вид, проиллюстрированный на рис. 8. При частоте

$$\omega^2_{\text{меж}} = \frac{k_2 + k_3 i_p^2 + k_4\left(1+i_p\right)^2}{m_0 i_p\left(i_p+1\right)} \tag{43}$$

межпарциальная связь «обнуляется» и система принимает вырожденную форму. В общем случае по каждой из координат возможны режимы динамического гашения колебаний на частотах

$$\omega^2_{1\text{дин}} = \frac{k_2 + k_3 i_p^2 + k_4\left(1+i_p\right)^2}{m_2 + m_0 i_p^2}, \tag{44}$$

$$\omega^2_{2\text{дин}} = \frac{k_2 + k_3 i_p^2 + k_4\left(1+i_p\right)^2}{m_0 i_p\left(i_p+1\right)}. \tag{45}$$

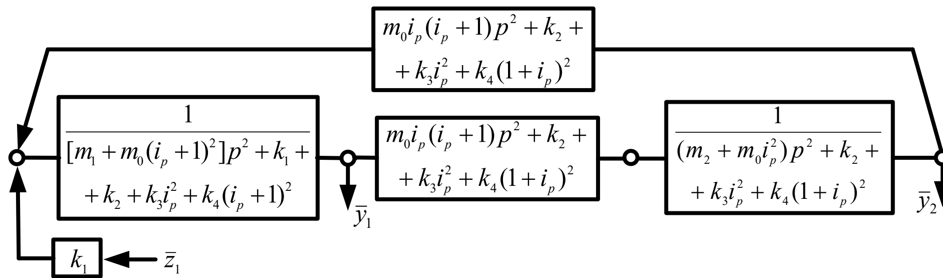


Рис. 8. Структурная математическая модель механической колебательной системы, изображенной на рис. 7

Fig. 8. Structural mathematical model of mechanical oscillatory system pictured in Fig. 7

Передаточные функции системы при кинематическом возмущении определяются из структурной схемы и имеют вид:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{k_1\bar{z}_1} = \frac{(m_2 + m_0 i_p^2)p^2 + k_2 + k_3 i_p^2 + k_4(1+i_p)^2}{A(p)}, \tag{46}$$

$$W_2(p)=\frac{\overline{y}_2}{k_1\overline{z}_1}=\frac{m_0 i_p(i_p+1)p^2+k_2+k_3 i_p^2+k_4(1+i_p)^2}{A(p)}, \qquad (47)$$

Введем понятие передаточной функции межпарциальных связей:

$$W_{12}(p)=\frac{\overline{y}_2}{\overline{y}_1}=\frac{m_0 i_p(i_p+1)p^2+k_2+k_3 i_p^2+k_4(1+i_p)^2}{(m_2+m_0 i_p^2)p^2+k_2+k_3 i_p^2+k_4(1+i_p)^2}, \qquad (48)$$

где

$$A(p)=\{[m_1+m_0(i_p+1)^2]p^2+k_1+k_2+k_3 i_p^2+k_4(i_p+1)^2\}\times$$
$$\times[(m_2+m_0 i_p^2)p^2+k_2+k_3 i_p^2+k_4(1+i_p)^2]-[m_0 i_p(i_p+1)p^2+k_2+k_3 i_p^2+k_4(1+i_p)^2]^2 \qquad (49)$$

— характеристическое частотное уравнение системы.

Если $i_р = 0$, то выражения (46), (47) трансформируются к виду:

$$W_1(p)=\frac{\overline{y}_1}{k_1\overline{z}_1}=\frac{m_2p^2+k_2+k_4}{A'(p)}, \qquad (50)$$

$$W_2(p)=\frac{\overline{y}_2}{k_1\overline{z}_1}=\frac{k_2+k_4}{A'(p)}, \qquad (51)$$

где

$$A'(p)=[(m_1+m_0)p^2+k_1+k_2+k_4]\cdot(m_2p^2+k_2+k_4)-(k_2+k_4)^2 \qquad (52)$$

— характеристическое частотное уравнение исходной системы при $i_p = 0$.

Парциальные частоты системы в общем случае определяются выражениями:

$$n_1^2=\frac{k_1+k_2+k_3 i_p^2+k_4(i_p+1)^2}{m_1+m_0(i_p+1)^2}, \qquad (53)$$

$$n_2^2=\frac{k_2+k_3 i_p^2+k_4(1+i_p)^2}{m_2+m_0 i_p^2}. \qquad (54)$$

При $k_1 = 0$ структурная схема на рис. 8 преобразуется в структурную схему диады, приведенную на рис. 9.

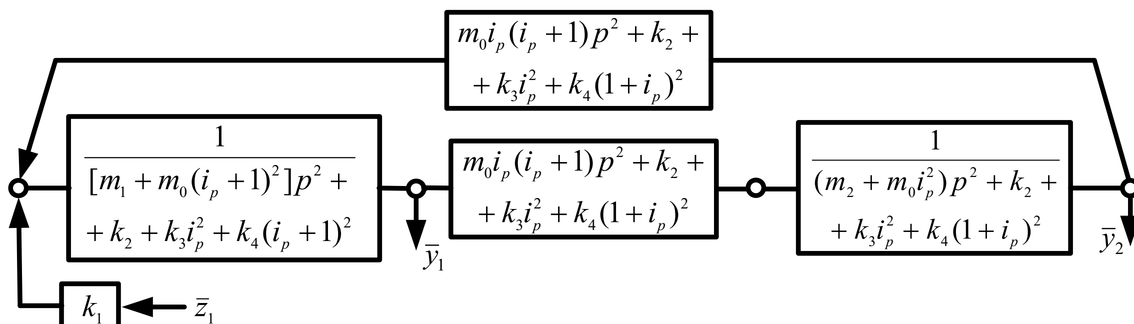


Рис. 9. Структурная схема диады в общем виде

Fig. 9. Dyad structural diagram in general form

Переход к унифицированной форме диады осуществляется на основе формальных приемов, которые заключаются в выделении для передаточных функций парциальных систем фрагментов, имеющих вид передаточных функций межпарциальных связей. Таким образом, по координате $\overline{y}_1$ справедливо выражение:

$$[m_1+m_0(i_p+1)^2]p^2+k_2+k_3 i_p^2+k_4(i_p+1)^2=m_1p^2+m_0(i_p+1)p^2+m_0 i_p(i_p+1)p^2+k_0=$$
$$=[m_1+m_0(i_p+1)]p^2+m_0 i_p(i_p+1)p^2+k_0=[m_1+m_0(i_p+1)]p^2+Lp^2+k_0. \qquad (55)$$

В свою очередь, по координате $\overline{y}_2$ получаем равенство:

$$(m_2+m_0 i_p^2)p^2+k_2+k_3 i_p^2+k_4(1+i_p)^2=(m_2-m_0 i_p)p^2+m_0 i_p(i_p+1)p^2+k_0=$$
$$=(m_2-m_0 i_p)p^2+Lp^2+k_0. \qquad (56)$$

Структурная схема (рис. 9) на основе выражений (55), (56) преобразуется к виду, изображенному на рис. 10.

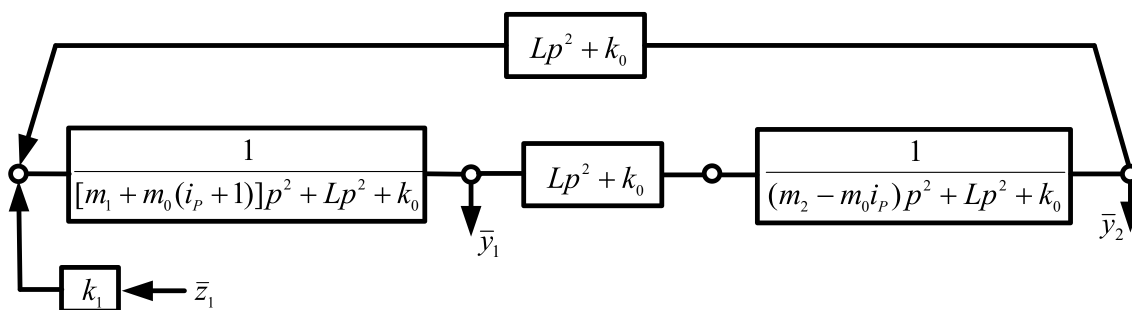


Рис. 10. Структурная схема диады с устройством для преобразования движения

Fig. 10. Dyad structural diagram with motion translation device

Таким образом, в составе расчетной схемы в виде механической колебательной системы с двумя степенями свободы (рис. 7), имеющей рычажный механизм второго рода может быть выделена диада. В диаде кроме обычных массоинерционных элементов $m_1' = m_1 + m_0(i_p + 1)$ и $m_2' = m_2 - m_0 i_p$ содержится УПД с передаточной функцией

$$L = m_0 i_p (i_p + 1), \qquad (57)$$

а также обобщенная пружина с коэффициентом жесткости k_0, который соответствует жесткости трех параллельно соединенных пружин:

$$k_0 = k_2 + k_3 i_p^2 + k_4 (i_p + 1)^2. \qquad (58)$$

При «обнулении» k_2, k_3, k_4 и m_0 система превращается в обычную диаду, рассмотренную в предыдущих разделах статьи.

Заключение. Диада в механических колебательных системах представляет собой структурное образование, которое в составе механических колебательных систем может рассматриваться как системообразующий элемент, предопределяющий динамические свойства системы в целом.

Доказано, что диада может быть выделена из исходной системы и представлена в условиях изоляции от связей с внешними элементами и опорными поверхностями, либо рассматриваться во взаимодействиях с такими поверхностями без учета сил сопротивления. В рамках такого подхода диада представляет собой систему с двумя степенями свободы, в которой соединение массоинерционных элементов происходит через линейную пружину.

Авторами развиты и детализированы представления о динамических свойствах диад, включающих в свой состав дополнительные связи, введенные параллельно упругому элементу, реализуемые в виде устройств для преобразования движения. Представлены структурные математические модели в динамическом отношении эквивалентные структурным схемам систем автоматического управления. Усилительное звено рассматривалось как эквивалент пружины, а звено УПД — как типовое звено структурной модели, имеющее передаточную функцию дифференцирующего элемента второго порядка.

Введение такого рода связей в структуру диады существенным образом изменило набор её динамических свойств по сравнению с обычными подходами. Показано, что устройство для преобразования движения с передаточной функцией дифференцирующего звена второго порядка может быть практически реализовано с использованием рычажных механизмов.

Таким образом, предложен метод построения математической модели диады общего вида: произведена оценка динамических свойств диад, выявлены новые динамические эффекты, отражающие возможности учета особенностей форм движения элементов диады и совместного действия внешних сил, что создает возможности для поиска и разработки новых подходов в управлении динамическим состоянием механических колебательных систем.

Библиографический список

1. I. A. Karnovsky, E. Lebed, Theory of vibration protection, doi 10.1007/978-3-319-28020-2. Switzerland, 2016. — 669 p.

2. De Silva, C. W. Vibration. Fundamentals and Practice / Clarence W. de Silva. — Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. — 957 p.

3. Елисеев, С. В. Динамическое гашение колебаний : концепция обратной связи и структурные методы математического моделирования / С. В. Елисеев, А. П. Хоменко. — Новосибирск : Наука, 2014. — 357 с.

4. Галиев, И. И. Методы и средства виброзащиты железнодорожных экипажей / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев. — Москва : Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. трансп., 2010. — 340 с.

5. Елисеев, С. В. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С. В. Елисеев, Ю. И. Резник, А. П. Хоменко, А. А. Засядко. — Иркутск : ИГУ, 2008. — 523 с.

6. Генкин, М. Д. Упруго-инерционные виброизолирующие системы. Предельные возможности, оптимальные структуры / М. Д. Генкин, В. М. Рябой. — Москва : Наука, 1988. — 191 с.

7. Eliseev S. V., Lukyanov A. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P. Dynamics of mechanical system with additional ties. Irkutsk, 2006. — 315 p.

8. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы / Д. П. Ким. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 288 с.

9. Каимов, Е. В. Оценка динамических свойств в системе с рычажными связями / Е. В. Каимов, А. И. Артюнин // Информационные и математические технологии в науке и управлении : труды XIX Байкальской Всероссийской конф. — Иркутск, 2014. — С. 123–130.

10. Каимов, Е. В. Особенности рычажных связей в схемах подвесок и приборов / Е. В. Каимов, В. Б. Кашуба // Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса юга России : труды межд. научно-практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 224–226.

11. Rocard Y. General Dynamics of Vibrations. Paris: Masson, 1949. – 458 p.

References

1. Karnovsky, I.A., Lebed, E. Theory of vibration protection. Switzerland, 2016, 669 p.

2. De Silva, C. W. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000, 957 p.

3. Eliseev, S.V., Khomenko, A.P. Dinamicheskoe gashenie kolebaniy: kontseptsiya obratnoy svyazi i strukturnye metody matematicheskogo modelirovaniya. [Dynamic oscillation suppression: feedback concept and structural methods of mathematical modeling.] Novosibirsk: Nauka, 2014, 357 p. (in Russian).

4. Galiev, I.I., Nekhaev, V.A., Nikolaev, V.A. Metody i sredstva vibrozashchity zheleznodorozhnykh ekipazhey. [Methods and means of vibration protection of railway vehicles.] Moscow: Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transp., 2010, 340 p. (in Russian).

5. Eliseev, S.V., Reznik, Y.I., Khomenko, A.P., Zasyadko, A.A. Dinamicheskiy sintez v obobshchennykh zadachakh vibrozashchity i vibroizolyatsii tekhnicheskikh ob"ektov. [Dynamic synthesis in generalized problems of vibration protection and vibration isolation of technical objects.] Irkutsk: IGU, 2008, 523 p. (in Russian).

6. Genkin, M.D., Ryaboy, V.M. Uprugo-inertsionnye vibroizoliruyushchie sistemy. Predel'nye vozmozhnosti, optimal'nye struktury. [Elastic-inertial vibration isolation systems. Limiting possibilities, optimal structures.] Moscow: Nauka, 1988, 191 p. (in Russian).

7. Eliseev S. V., Lukyanov A. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P. Dynamics of mechanical system with additional ties. Irkutsk, 2006, 315 p.

8. Kim, D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Lineynye sistemy. [Automatic control theory. Vol. 1. Linear systems.] Moscow: FIZMATLIT, 2003, 288 p. (in Russian).

9. Kaimov, E.V., Artyunin, A.I. Otsenka dinamicheskikh svoystv v sisteme s rychazhnymi svyazyami. [Estimation of dynamic properties in linkage system.] Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii: trudy XIX Baykal'skoy Vserossiyskoy konf. [Information and Mathematical Technologies in Science and Management: Proc. XIX Baikal All-Russian Conf.] Irkutsk, 2014, pp. 123–130 (in Russian).

10. Kaimov, E.V., Kashuba, V.B. Osobennosti rychazhnykh svyazey v skhemakh podvesok i priborov. [Linkage features in carriages and devices.] Perspektivy razvitiya i effektivnost' funktsionirovaniya transportnogo kompleksa yuga Rossii: trudy mezhd. nauchno-prakt. konf. [Development prospects and efficiency of transport complex in the south of Russia: Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.] Rostov-on-Don, 2015, pp. 224–226 (in Russian).

11. Rocard, Y. General Dynamics of Vibrations. Paris: Masson, 1949, 458 p.

Поступила в редакцию 23.06.2017
Сдана в редакцию 23.06.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 23.06.2017
Submitted 23.06.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Елисеев Сергей Викторович,
директор НОЦ современных технологий, системного анализа и моделирования Иркутского государственного университета путей сообщения (РФ, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6876-8786
eliseev_s@inbox.ru

Орленко Алексей Иванович,
директор Красноярского института железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (РФ, 660028, г. Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 89), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6639-9059
Orlenko_AI@krsk.irgups.ru

Нгуен Дык Хуинь,
аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения (РФ, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9003-5378
Huynhnd1987@gmail.com

Authors:

Eliseev, Sergey V.,
director, REC of High Technologies, System Analysis and Modeling, Irkutsk State Railway Transport Engineering University (RF, 664074, Irkutsk, ul. Chernyshevskogo, 15), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6876-8786
eliseev_s@inbox.ru

Orlenko, Alexey I.,
director, Krasnoyarsk Institute of Rail Transport, Branch of Irkutsk State Transport Engineering University (RF, 660028, Krasnoyarsk, ul. Lado Ketskhovely, 89), Cand. Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6639-9059
Orlenko_AI@krsk.irgups.ru

Nguyen Duc Huynh,
postgraduate student, Irkutsk State Railway Transport Engineering University (RF, 664074, Irkutsk, ul. Chernyshevskogo, 15),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9003-5378
Huynhnd1987@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 631.31:681.2.083:631.421 10.23947/1992-5980-2017-17-3-60-69

Определение характеристик компонентов композитных материалов, предназначенных для производства деталей сельскохозяйственной техники*

И. Р. Антибас[1], А. Г. Дьяченко[2]**

[1, 2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Studies on characterization of composite materials components for part production in agricultural industry***

I. R. Antypas[1], A. G. Dyachenko[2]**

[1, 2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. До настоящего времени использованию композитных материалов в производстве деталей сельскохозяйственной техники не уделялось должного внимания, т. к. было достаточно трудно предсказать их поведение при воздействии определенного рода нагрузок. Однако в связи с открытием и производством новых видов материалов научный и прикладной интерес к композитам растет. Цель исследования — изучение свойств компонентов композитных материалов для их использования при производстве деталей сельскохозяйственной техники. В частности, ставилась задача оказать содействие производителям в доступе к новым технологиям, продемонстрировать возможность локализации производства композитных материалов. Исследованные композиты могут применяться при выпуске труб и рабочих органов рыхлителей.

Материалы и методы. В работе рассмотрены компоненты, доступные на внутреннем рынке. В качестве материала выбрано стекловолокно, а в качестве связующего состава — полиэстер. Кроме того, для каждого вида материала были проведены исследования по определению значений модуля упругости и плотности при растяжении, изгибе и сдвиге, а также на устойчивость к растяжению при этих видах деформации.

Результаты исследования. Результаты экспериментов позволяют утверждать, что по физико-механическим свойствам стекловолокно является наилучшим из рассмотренных материалов (стекловолокно, карбон и слоистый карбон). Значение плотности материала, полученного экспериментально, составило 1183 кг/м^3. Экспериментальное значение модуля упругости при растяжении — E = 1585 МПа. Опыты по определению физико-механических характеристик связующего компонента показали, что на 85 % соответствует эталону полиэстер, и это наилучший результат.

Обсуждение и заключения. Рассматривались механические свойства композитного материала, изготовленного в виде пакета слоев стекловолокна и связующего вещества — демпфирующего полиэстера. При этом сравнивались значения практических и теоретических результатов. В итоге опыт на статическое растяжение материала дал экспериментальное

***Introduction*.** Until now, the use of composite materials has not received due attention because of the fact that their behaviour under the effect of certain kinds of loads is difficult enough to predict. However, in connection with the discovery and production of new types of materials, they begin to play an increasing role because of their high mechanical and physical properties. The objective of the conducted investigations is to study properties of the composite materials components for their application in the part production of agricultural machinery. Particularly, the task is to assist manufacturers in getting access to new technologies, to demonstrate the possibility of localizing the composite materials production. The considered composites can be used for the production of pipes and ripper tools.

Materials and Methods. The components available at the domestic market are studied. Fiberglass is selected as a material, and polyester – as a binder. In addition, for each type of material, studies have been carried out to determine the modulus of elasticity and density in tension, bending and shear, and also the tensile strength under these types of deformation.

Research Results. The experimental results allow arguing that fiberglass is the best from the examined components (fiberglass, carbon, and layered carbon) according to its physical and mechanical properties. The binder material density value obtained experimentally is 1183 kg / m^3, and the experimental value of the tensile modulus E = 1585 MPa. The experiments on testing physical and mechanical characteristics of the binder component have shown that polyester corresponds to the standard by 85%, and this is the best result.

Discussion and Conclusions. The mechanical properties of a composite material made in the form of a stack of fiberglass layers and a binder, dampening polyester, were considered. In this case, the values of practical and theoretical results were compared. As a result, the testing on the material static tension has given the ex-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: imad.antypas@mail.ru, Dyachenko_aleshka@bk.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

значение модуля упругости E_{cm} = 4836 МПа, модуль упругости на растяжение — E_c = 1530 МПа. Это отличается от значения, приведенного для стекловолокна методом нарезки и случайного смешивания (E_c = 3200 МПа).

perimental value of the elasticity modulus of E_{cm} = 4836 MPa, and the tensile modulus – E_c = 1530 MPa. This differs from the value given for fiberglass by the cutting and random mixing technique (E_c = 3200 MPa).

Ключевые слова: волокна, полиэстер, композитные материалы, механические характеристики композитных материалов.

Keywords: fibers, polyester, composite materials, mechanical properties of composite materials.

Образец для цитирования: Антибас, И. Р. Определение характеристик компонентов композитных материалов, предназначенных для производства деталей сельскохозяйственной техники / И.-Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 60–69.

For citation: I. R. Antypas, A. G. Dyachenko. Studies on characterization of composite materials components for part production in agricultural industry. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 60–69.

Введение. В рамках данной работы были исследованы композитные материалы из полимерного волокна, широко применяемые в современном строительстве и промышленности. Они используются также для образования многослойных основ, состоящих из длинных или коротких волокон, образующих ткань. Количество слоев в данном случае напрямую зависит от требуемого уровня сопротивления нагрузкам. Часто такие волокна изготавливают из стекла, углерода, кевлара и других компонентов, доступных на внутреннем рынке. В качестве связующего элемента выступают эпоксид, полиэстер и винилэстер.

В [1] описаны исследования по определению влияния объемного соотношения стекловолокна на механические свойства полипропилена, укрепленного стекловолокном. Были получены следующие результаты.

1. Объемное соотношение стекловолокна увеличивалось пропорционально увеличению изгибных и растягивающих свойств композитных материалов.

2. При увеличении объемного соотношения стекловолокна на 15–20 % происходило увеличение предела прочности композитного материала при его растяжении и изгибе, но при дальнейшем увеличении прочностные свойства снижались. Данный результат интерпретировался следующим образом: в материале за счет концентрации напряжений на концах слабых волокон формировались локальные микроскопические трещины, что оказывало влияние на прочность сцепления стекловолокна.

В [2, 3] было определено, что с увеличением объемного соотношения стекловолокна на 30 % значения модулей упругости при сдвиге и растяжении материала повышаются. При изгибе это увеличение имеет особенно важное значение и под влиянием растягивающих усилий отклоняется от линейного. Также было установлено, что композитные материалы в условиях растяжения и изгиба ведут себя не так, как при испытаниях на прочность сдвига, и в зависимости от соотношения стекловолокна наблюдается квазилинейное поведение модуля упругости.

В [4] изучалась методика обработки поверхности волокна и его модификаций. Волокна очищали раствором антисептика и нагревали до температуры 72 °С в течение часа, затем промывали дистиллированной водой и сушили в сушильном шкафу до 70 °С. Далее волокна помещали в смесь этанола и бензина при соотношении 1÷2, выдерживали в течение 72 часов, промывали дистиллированной водой и высушивали воздухом.

В [5] представлены возможности применения композитных материалов в строительстве и автомобильной промышленности. В частности, установлено, что при проектировании композитных материалов в автомобильной промышленности предпочтительно использовать тканевые слои, дополнительно усиленные рублеными волокнами.

В ходе экспериментов определялись характеристики трех материалов в условиях чрезвычайных происшествий в результате воздействия ударных нагрузок. Во всех трех случаях связующим веществом был полиуретан. В первом опыте использовалось стекловолокно, причем стеклянные волокна были нарезаны вручную и рассеянны случайным образом. Во втором — карбон, причем углеродные волокна представляли собой слои, пересекающиеся под углом 45^0 или 90^0. В третьем случае использовался слоистый карбон, углеродные волокна также пересекались под углом 45^0 и 90^0, при этом свойства углеродного волокна были почти однородны во всех направлениях. Определялись механические свойства материалов под воздействием растягивающих усилий.

Целью данного исследования является изучение свойств компонентов композитных материалов с учетом возможности их применения для изготовления деталей сельскохозяйственной техники. Кроме того, ставилась задача оказать содействие производителям в доступе к новым технологиям, продемонстрировать возможность локализации производства композитных материалов.

Материалы, использованные при исследованиях. В ходе экспериментов оценивались свойства материалов, доступных на внутреннем рынке. Исследованные композиты рассматривались с точки зрения пригодности для производства труб и рабочих органов рыхлителей.

Материал волокон — стекловолокно. Этот наиболее широко используемый материал представляет собой изоляционное стекло, состоящее из кремния, карбона кальция и натрия. Его получают в процессе нагрева и смешивания компонентов при температуре выше 1000 °С. Диаметр волокон — от 5 до 13 мкм. Стекловолокно имеет ряд преимуществ: высокая механическая прочность к разрушению, относительно высокий модуль упругости, устойчивость к коррозии, низкий удельный вес и низкая себестоимость. Для защиты от трения на обрабатываемую поверхность волокна наносятся в виде текстурированной пены. Кроме того, соединения волокон предотвращают адгезию волокнистого материала. В результате возникает сильное сцепление, которое придает прочность конструкции. Обычно используются материалы нескольких типов, которые могут быть сформированы в виде структурированной ткани (рис. 1, *а*), а также в виде нарезанных и рассеянных коротких волокон (рис. 1, *б*).



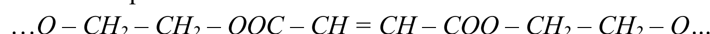
а) *b*)

Рис. 1. Стеклянные волокна в виде ткани (*а*); нарезанные и рассеянные стеклянные волокна (*б*)

Fig. 1. Fiberglass in the form of fabric (a); cut and scattered fiberglass (b)

Связующий материал — полиэстер. Волокнистые материалы обеспечивают продольную прочность при растяжении, изгибе и срезе связующего материала, а также оказывают сопротивление сдвигу, сжатию, поперечному растяжению. Таким образом, корректное сочетание компонентов композита принципиально важно для обеспечения необходимых механических свойств. Связующий материал должен улучшать механические свойства композитных материалов в поперечном направлении, повышать устойчивость к ударам и разрушению, а также предотвращать рост трещин композита в результате напряжений.

Химическая формула полиэстера:



$$\ldots O - CH_2 - CH_2 - OOC - CH = CH - COO - CH_2 - CH_2 - O\ldots$$

По этой формуле получается материал на основе смол органического и синтетического происхождения (композитная органическая матрица), обладающий высокой химической, электро- и термостойкостью (в течение длительного времени может выдерживать температуру до 260 °С). Другие преимущества: простота в изготовлении литых форм, хорошая растворимость в воде и отсутствие запаха.

Практические исследования. Рассматривались физико-механические свойства ключевых компонентов композитного материала (стекловолокна и полиэстера), а также различных композитных материалов. Полученные результаты сравнивались с данными, представленными в научной литературе.

Испытания, проведенные на связующем материале

А. *Определение типа связующего компонента при помощи спектрометра инфракрасного излучения* [6]

Длина волны спектра испытуемого вещества определялась с помощью устройства *ThermoNicolet*. Затем полученные результаты сравнивали с имеющимся в памяти устройства массивом графиков длин волн различных материалов. Определяли тип испытуемого вещества и его процентный состав. На основании этих сравнений было установлено, что для использования в композите оптимально подходит полиэстер — он соответствует эталонным требованиям на 85 %, и это лучший результат. Результаты спектрального анализа полиэстера представлены на рис. 2.

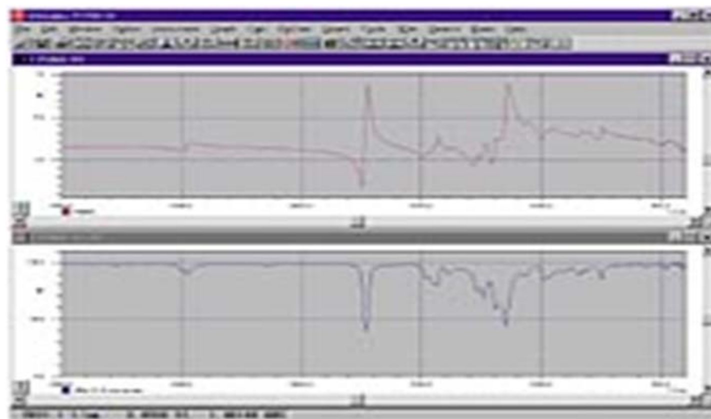


Рис. 2. Результаты спектрального анализа полиэстера

Fig. 2. Results of polyester spectral analysis

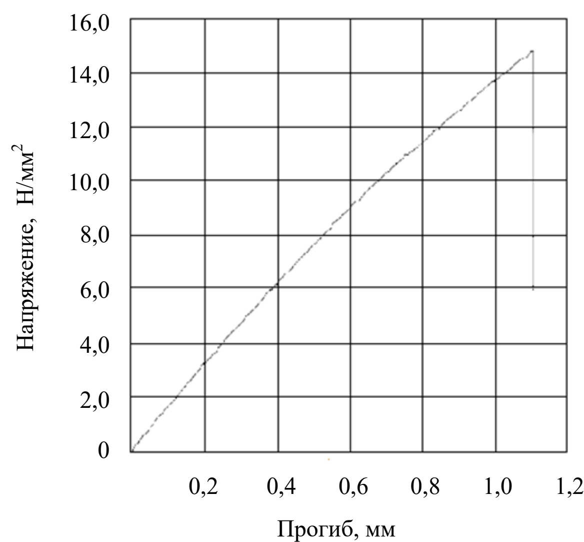
Б. *Определение удельного веса* (*плотности*)

Плотность связующего вещества определялась путем измерения блока связующего материала. С этой целью он погружался в стандартную емкость, заполненную водой. В результате было получено значение $\rho_m = 1183$ кг/м^3, которое отражает удельный вес связующего материала [7].

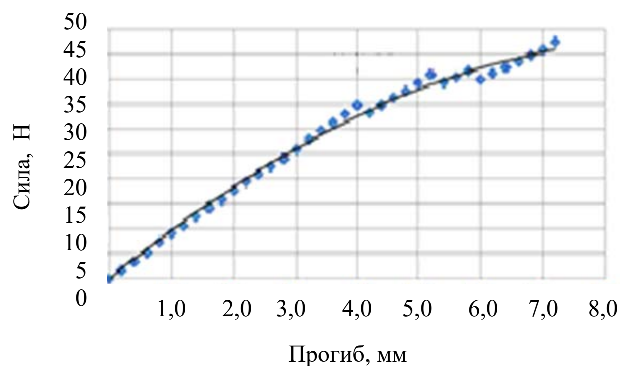
В. *Испытание на растяжение*

Рассматривались образцы с конкретными параметрами связующего материала (полиэстера), соответствующие международным стандартам для данного вида испытаний (ASTM: D638-95). Образцы закреплялись способом, не вызывающим деформаций и разрушения в области фиксации [8].

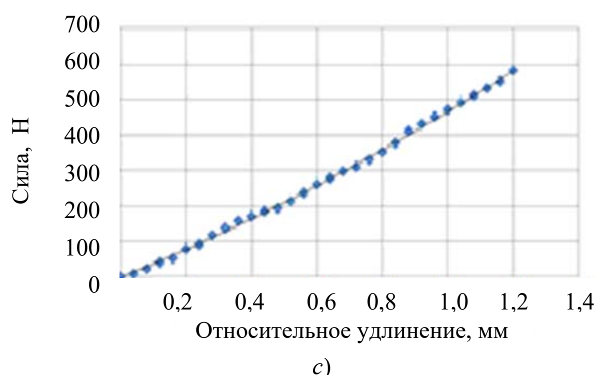
Результаты опыта представлены в виде кривой напряженно-деформированного состояния материала (рис. 3, *a*).



a)



b)



c)

Рис. 3. График поведения связующего материала: при растяжении (*a*); при изгибе (*b*) и при сдвиге (*c*)

Fig. 3. Graph of the binder behavior: under tension (a); under bending (b), and under shearing (c)

По данным графика, отражающего поведение материала, можно вычислить модуль упругости связующего компонента при растяжении. Среднее значение модуля упругости протестированных образцов составило E_{mt} = 1575 МПа.

Г. *Испытание на изгиб*

Опыты проводились на разрывной машине, что дало возможность сделать тест конструкции на изгиб в соответствии со стандартом *ASTM* 790-95a. Устройство состоит из четырех колодок с небольшим расстояние между ними. Пластина-образец опирается на скользкие ролики, и при изгибе могут быть проведены испытания на сдвиг между слоями материала в трех или четырех точках (рис. 4).

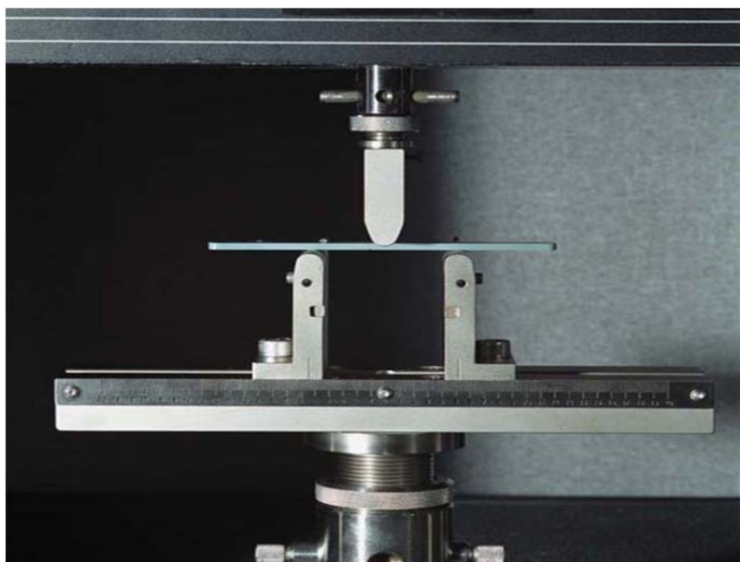


Рис. 4. Разрывная машина, в которой закреплен лист для проведения опытов на изгиб

Fig. 4. Tensile testing machine in which a sheet for bending experiments is fixed

В исследовании материала на изгиб использовались образцы со следующими параметрами: длина — 120 мм, ширина — 12,5 мм, толщина — 3,5 мм. Расстояние между зажимами составляло 64 мм, скорость изгиба — 2 мм/мин.

По итогам обработки результатов эксперимента получен график нагрузки (см. рис. 3, *б*), отражающий также соотношение между нагрузкой и изгибающим действием до фазы разрушения. Исходя из данных этого графика, можно вычислить напряжение и модуль упругости при изгибе: σ_b = 31 МПа и E_b = 1522 МПа.

Д. *Испытание на сдвиг*

Для проведения опытов полиэстер отливался в металлическую форму. Затем добавляли ускоритель, затвердитель и ждали, пока материал остынет [9].

После этого были выбраны условия испытаний в соответствии со стандартом *ASTM*: *D*732-93: диаметр образцов — 50 мм, диаметр испытательной головки — 11 мм, скорость сдвига — 1,25 мм/мин, температура воздуха — 23 °С.

По итогам тестирования на сдвиг группы образцов был получен график нагрузки, представленный на рис. 3, *в*. С учетом данных рис. 3, *в* определяется максимальное значение напряжений сдвига. Его получили путем деления ве-

личины силы сдвига на площадь давления, равную диаметру цилиндра испытательной головки (высотой выступала толщина образца). Искомая величина составила τ = 15 Н/мм². Значение модуля упругости при сдвиге данного связующего материала определяется по формуле

$$G = \frac{E}{2(1+\vartheta)} = 566 \text{ МПа},$$

где E — модуль упругости в продольном направлении, МПа; ϑ — коэффициент Пуассона.

Характеристики стекловолокна. Основной характеристикой стекловолокна является способность обеспечивать стабильность по напряжениям в продольном направлении, что особенно важно для производства оптического волокна. С этой точки зрения главной задачей представляется испытание волокон на растяжение и уточнение значений их плотности, а затем сравнение полученных результатов с теоретическими значениями.

Измерение плотности стекловолокна. Плотность волокна измеряли таким же образом, как и плотность связующего материала. В итоге получилось $\rho_f = 2500$ кг/м^3. Этими параметрами выражается также удельный вес волокон.

Измерение площади поперечного сечения. С помощью электронного микроскопа измеряли диаметр волокна и площадь поперечного сечения. Кроме того, вычислили среднее количество волокон в пучке. Для этого вес нескольких волокон сравнили с весом пучка и с учетом полученных данных определили площадь поперечного сечения всего пучка: A = 0,7 мм².

Растяжение стекловолокна. Этот опыт трудно выполнить из-за хрупкости отделившихся волокон на кончике верхнего фиксатора. Для их упрочнения и образования оправок по краю волокна выливали резиновый материал, чтобы ослабить силу давления фиксирующего устройства на волокна. Размеры растягивающихся образцов определялись в соответствии с международным стандартом для этих испытаний (*ASTM D* 2343-95):

— длина зажатого фиксатором волокна — 25 см,

— длина зажимов с обеих сторон — 5 см,

— скорость приложения нагрузки — 12,7 м/с,

— температура воздуха — 23 °С.

На рис. 5 показаны результаты испытаний, полученные при исследовании деформации волокон по напряжениям растяжения.

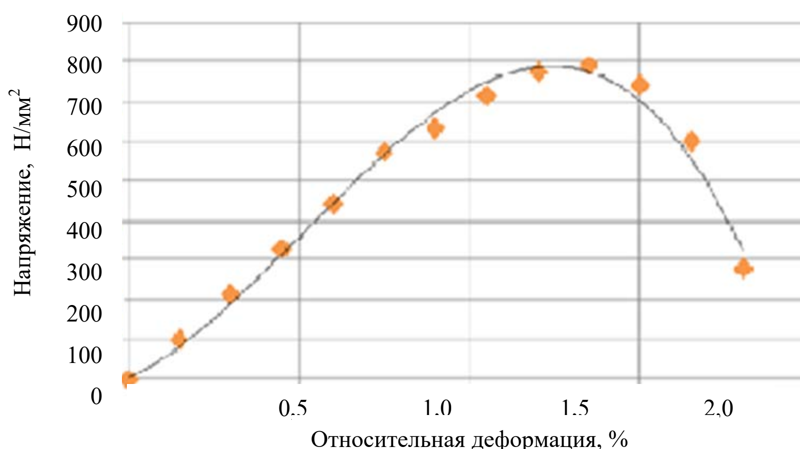


Рис. 5. Деформация волокон при растяжении

Fig. 5. Fiber deformation under tension

Полученный график отражает поведение волокон при их растяжении и позволяет определить общее среднее значение модуля упругости протестированных образцов, который равен E_{1f} = 70791 МПа.

Определение характеристик композитных материалов

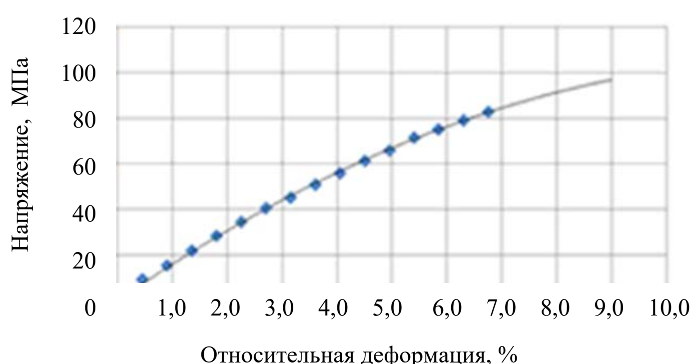
Производство композитных материалов. В качестве связывающего вещества был использован резиновый полиэстер. Он смешивался со стекловолокном, порезанным и рассеянным случайным образом. Добавлялись 2 % за-

твердителя и 0,5 % катализатора. Поверхностная плотность — 300 г/см^2 соответствует механическим свойствам, изученным ранее.

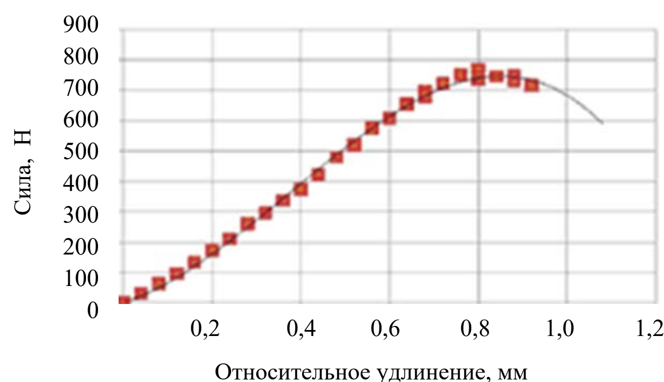
При формировании трехслойного образца (M_3) использовался метод литья в пресс-форму — деревянную рамку 300 × 400 мм толщиной 3 мм. Чтобы предотвратить прилипание образца к столу и обеспечить легкое смещение, металлическую пластину и раму покрывали слоем воска. Объем трех слоев материала сопоставим с размерами пресс-формы. Слой связующего компонента, покрывающего материал, располагался выше первого слоя и придавливался гнетом для удаления пузырьков воздуха между волокнами композита и связующего вещества. Образцы затвердевали при комнатной температуре в течение по крайней мере 24 часов.

Испытания слоистого композитного материала

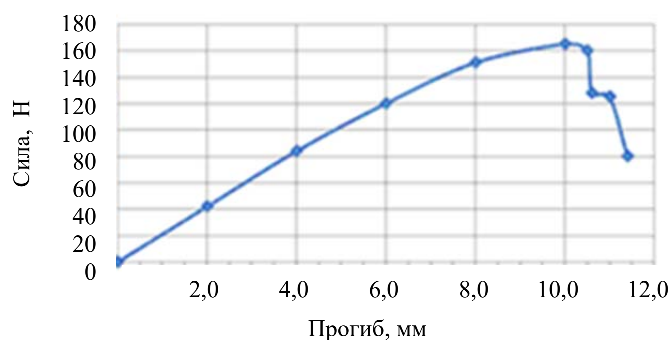
Испытание на растяжение. Для проведения опыта на растяжение слоистого композитного материала в соответствии со стандартом *ASTM*:*D* 3039/*D* были подготовлены 10 образцов со следующими средними размерами: толщина — 3,19 мм, ширина — 20,36 мм, длина — 260 мм. В результате испытаний был получен график растяжения (рис. 6, *а*).



а)



b)



c)

Рис. 6. Поведение слоистого композитного материала при растяжении (*a*); при сдвиге (*b*) и при изгибе (*c*)

Fig. 6. Layered composite material behavior under tension (a); under bending (b), and under shearing (c)

Учитывая данные графика растяжения слоистого композитного материала, находим значение опытного модуля упругости при растяжении: $E_c = 1530$ МПа. При расчете его теоретического значения учитываются объемное соотношение волокна, а также модули упругости связующего материала и стекловолокна. Данное значение определяется в соответствии с эмпирической зависимостью [10]:

$$E_{cm} = V_{fм}(16/45\ E_f + 2E_m) + 8/9\ E_m, \quad (1)$$

где V_{fm} — объемное соотношение волокна; E_f — модуль упругости волокна; E_m — модуль упругости связующего материала.

Испытание на сдвиг. Испытание на сдвиг проводилось на изгибающем устройстве в соответствии со стандартной методикой, предусмотренной *ASTM D790-95a*. Исходя из данных графика (см. рис. 6, *б*), вычислялось значение разрушающего напряжения при сдвиге. Оно равно $\tau = 22$ МПа. Значение модуля упругости при сдвиге определяется по формулам:

$$\vartheta_c = \vartheta_f x V_f + \vartheta_m x V_m = 0{,}376, \quad (2)$$

$$G = \frac{E_c}{2(1+\vartheta_c)} = 556,\ \text{МПа}, \quad (3)$$

где ϑ_f — коэффициент Пуассона материала волокон; ϑ_m — коэффициент Пуассона связующего материала; V_f — объемное соотношение волокна; V_m — объемное соотношение связующего материала; ϑ_c — коэффициент Пуассона композитного материала.

Теоретическое значение модуля упругости, которое представлено в величинах объемного соотношения волокна и всего материала, вычисляется по формуле:

$$G_{cm} = V_{fm}(2/15\ E_f + E_m) + 1/3\ E_m. \quad (4)$$

Полученное значение составило: $G_{cm} = 1813$ МПа.

Испытание на изгиб. Изгибное устройство использовалось в соответствии со следующими условиями:

— скорость изгиба — 2 мм/мин,

— температура воздуха — 23 °С,

— количество образцов — 5.

Средние размеры образцов: толщина — 2,5 мм, ширина — 10,35 мм, длина — 64 мм.

На рис. 6, *в* показан график испытания образцов слоистого композитного материала под нагрузкой до фазы разрушения. Данный график отражает значения напряжения и модуля упругости, которые были определены:

$$\sigma_b = 68{,}5\ \text{МПа},$$

$$E_b = 43010\ \text{МПа}.$$

Выводы. Тестирование по определению материала связующего компонента доказало, что для использования в композите оптимально подходит полиэстер — он соответствует требованиям на 85 %, и это лучший результат.

Значение плотности связующего материала, полученное экспериментально, — 1183 кг/м^3, что отличается от эталонного значения (1200 кг/м^3). Экспериментальное значение модуля упругости при растяжении ($E = 1585$ Мпа) также ниже теоретического значения (4000 Мпа). Значение модуля упругости стекловолокна, полученное в результате опытов, в значительной степени совпало с теоретическим и составило 70 ГПа. При этом оно оказалось близко к эталонному значению — 74 ГПа.

Что касается сравнения значений практических и теоретических данных о механических свойствах многослойного композитного материала с полиэстером в качестве связующего демпфера (M_3), следует обратить внимание на следующие результаты.

Опыт на статическое растяжение материала показал различие значений модуля упругости: экспериментальное — $E_c = 1530$ Мпа; теоретическое (для стекловолокна, полученного путем нарезки и случайного смешивания) — $E_c = 3200$ МПа.

Это объясняется следующими факторами:

— наличие пузырьков и пористости в слоистом материале,

— влияние режима сдвига во время отбора проб и обработки данных,

— появление микроскопических трещин в образце.

Что касается модуля упругости при сдвиге, то его значение также будет меняться, и это доказано экспериментально.

Итак, опыты с компонентами композитного материала (связующий материал и волокна) дали идентичные результаты, которые достаточно хорошо согласуются с эталонными значениями для этих переменных компонентов.

При исследовании композитного слоистого материала (M_3) было обнаружено, что переменные параметры производственного процесса, возможно, лишь незначительно повлияли на его механические свойства при растяжении, изгибе и сдвиге благодаря присутствию отдельных пузырьков воздуха и возникновению микроскопических трещин. Все это будет принято во внимание в будущих работах.

Библиографический список

1. Meraghnia, F. Implementation of a constitutive micromechanical model for damage analysis in glass mat reinforced composite structures / F. Meraghnia, F. Desrumauxb, M.-L. Benzeggaghb // Composites Science and Technology. — 2002. — № 62 — P. 2087–2097.

2. Lee, N.-J. The effect of fiber-content gradient on the mechanical properties of glass-fiber-mat/polypropylene composites / N. J. Lee, J. Jang // Composites Science and Technology. — 2000. — № 60. — P. 209–217.

3. The influence of fiber treatment on the performance of coir-polyester composites / J. Rout [et al.] // Composites Science and Technology. — 2001. — № 61. — P. 1303–1310.

4. Smith, C.-S. Design of marine structures in composite materials / C.-S. Smith // London : Elsevier, 1990. — 389 p.

5. Corum, J.-M. Low-energy impact effects on candidate automotive structural composites / J.-M. Corum, R. L. Battiste, M. B. Ruggles-Wrenn // Composites Science and Technology. — 2003. —№ 63. — P. 755–769.

6. Антибас, И. Р. Влияние формы гофрированного картона на амортизирующие свойства упаковки / И. Р. Антибас, С. А. Партко, А. Н. Сиротенко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 1 (84). — С. 36–42.

7. Kharmanda, G. System reliability-based design optimization using optimum safetyfactor with application to multifailure fatigue analysis / G. Kharmanda, I. R. Antypas // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 10-й Междунар. юбилейной науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2017. — С. 177–179.

8. Антибас, И. Р. Изготовление теплоизоляционного материала и изучение его теплофизических и механических свойств / И. Р. Антибас А. Г. Дьяченко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 10-й Междунар. юбилейной науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону, 2017. — С. 182–183.

9. Антибас, И. Р. Влияние содержания древесного дисперсного наполнителя на долговечность композиционных материалов / И. Р. Антибас А. Г. Дьяченко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 1 (88). — С. 67–74.

10. Kharmanda, G. Integration of reliability and optimization concepts into composite yarns / G. Kharmanda, I. R. Antypas // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 10-й Междунар. юбилейной науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2017. — С. 174–176.

References

1. Meraghnia, F., Desrumauxb, F., Benzeggaghb, M.-L. Implementation of a constitutive micromechanical model for damage analysis in glass mat reinforced composite structures. Composites Science and Technology, 2002, no. 62, pp. 2087–2097.

2. Lee, N.-J., Jang, J. The effect of fiber-content gradient on the mechanical properties of glass-fiber-mat/polypropylene composites. Composites Science and Technology, 2000, no. 60, pp. 209–217.

3. Rout, J., et al. The influence of fiber treatment on the performance of coir-polyester composites. Composites Science and Technology, 2001, no. 61, pp. 1303–1310.

4. Smith, C.-S. Design of marine structures in composite materials. London: Elsevier, 1990, 389 p.

5. Corum, J.-M., Battiste, R.-L., Ruggles-Wrenn, M.-B. Low-energy impact effects on candidate automotive structural composites. Composites Science and Technology, 2003, no. 63, pp. 755–769.

6. Antypas, I. R., Partko, S.A., Sirotenko, A.N. Vliyanie formy gofrirovannogo kartona na amortiziruyushchie svoystva upakovki. [Effect of corrugated cardboard shape on the packing damping properties.] Vestnik of DSTU, 2016, vol. 16, no. 1 (84), pp. 36–42 (in Russian).

7. Kharmanda, G., Antypas, I. R. System reliability-based design optimization using optimum safety factor with application to multifailure fatigue analysis. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. statey 10-y Mezhdunar. yubileynoy nauch.-prakt. konf. v ramkakh 20-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2017». [State and prospects of agricultural machinery development: Proc. 10th Int. Jubilee Sci.-Pract. Conf. within framework of the 20th Int. Agroindustrial Exhibition "Interagromash-2017".] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2017, pp. 177–179.

8. Antypas, I. R., Dyachenko, A.G. Izgotovlenie teploizolyatsionnogo materiala i izuchenie ego teplofizicheskikh i mekhanicheskikh svoystv. [Manufacturing of heat-insulating material and study of its thermophysical and mechanical properties.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. statey 10-y Mezhdunar. yubileynoy

nauch.-prakt. konf. v ramkakh 20-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2017». [State and prospects of agricultural machinery development: Proc. 10th Int. Jubilee Sci.-Pract. Conf. within framework of the 20th Int. Agroindustrial Exhibition “Interagromash-2017”.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2017, pp. 182–183 (in Russian).

9. Antypas, I. R., Dyachenko, A.G. Vliyanie soderzhaniya drevesnogo dispersnogo napolnitelya na dolgovechnost' kompozitsionnykh materialov. [Effect of wood particulate filler content on durability of composite materials.] Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no. 1 (88), pp. 67–74 (in Russian).

10. Kharmanda, G., Antypas, I. R. Integration of reliability and optimization concepts into composite yarns. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. statey 10-y Mezhdunar. yubileynoy nauch.-prakt. konf. v ramkakh 20-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2017». [State and prospects of agricultural machinery development: Proc. 10th Int. Jubilee Sci.-Pract. Conf. within framework of the 20th Int. Agroindustrial Exhibition “Interagromash-2017”.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2017, pp. 174–176.

Поступила в редакцию 12.03.2017
Сдана в редакцию 12.03.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 12.03.2017
Submitted 12.03.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Антибас Имад Ризакалла,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8141-9529
imad.antypas@mail.ru

Дьяченко Алексей Геннадьевич,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9934-4193,
Dyachenko_aleshka@bk.ru

Authors:

Antypas, Imad R.,
associate professor of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University
(RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8141-9529
imad.antypas@mail.ru

Dyachenko, Alexey G.,
associate professor of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University
(RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
Cand. Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9934-4193 ,
Dyachenko_aleshka@bk.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.891 + 06 10.23947/1992-5980-2017-17-3-70-77

Расчетная модель упорного подшипника с пористым покрытием на поверхности направляющей*

М. А. Мукутадзе[1], А. Н. Гармонина[2], В. М. Приходько[3]**
[1,2,3]Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Design model of thrust bearing with porous coating on the way surface ***

M. A. Mukutadze[1], A. N. Garmonina[2], V. M. Prikhodko[3]**
[1,2,3]Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена разработке расчетной модели упорного подшипника скольжения с двухслойным пористым покрытием на поверхности направляющей, работающего на электропроводящем смазочном материале. Целью работы являются: разработка и численное обоснование возможного увеличения маслоемкости, повышения несущей способности и уменьшения силы трения в результате уточнения их расчетных моделей. Это основано на формировании расчетных гидродинамических моделей упорных подшипников с учетом зависимости проницаемости пористых слоев на поверхности направляющей при установившемся течении электропроводящего жидкого смазочного материала.

Материалы и методы. Предложены новые математические модели, описывающие установившееся движение электропроводящего смазочного материала в рабочем зазоре между наклонным ползуном и направляющей с двухслойным пористым покрытием. Приведенный численный анализ основных рабочих характеристик показал, что подшипники с двухслойным пористым покрытием на поверхности направляющей, значительно повышают демпфирующие характеристики опор, несущую способность подшипника и уменьшают силу трения.

Результаты исследования. На основе уравнений установившегося движения электропроводящего несжимаемого жидкого смазочного материала для «тонкого слоя» в рабочем зазоре, неразрывности и Дарси при наличии электромагнитного поля, сформирована расчетная модель упорного подшипника скольжения с учетом проницаемости пористого покрытия на поверхности направляющей. Авторами найдено точное автомодельное решение упорного подшипника с двухслойным пористым покрытием на поверхности направляющей для поля скоростей и давлений в смазочном слое и пористом покрытии, а также многопараметрические выражения для основных рабочих характеристик подшипника, учитывающих наличие электромагнитных полей, проницаемость пористых слоев и отношение толщин пористых слоев.

Обсуждение и заключения. Полученные уточненные расчетные модели позволили установить влияние ряда дополнительных факторов, а также выполнить сравнительный анализ

Introduction. The development of the design model of a thrust sliding bearing with a two-layer porous coating on the way surface running on an electrically conductive lubricant is described. The work objectives are the development and computational justification of the possible increase in oil consumption, growth of the bearing capacity, and reduction of the frictional force, due to their design models refinement. This is based on the formation of the computed hydrodynamic models of thrust bearings taking into account the dependence of the porous layers permeability on the way surface under the steady flow of the electroconductive liquid lubricant.

Materials and Methods. New mathematical models that describe a steady flow of the electrically conductive lubricant in the working gap between an inclined slider and a guide with a bilayered porous coating are proposed. The given numerical analysis of the essential performance features has shown that bearings with a two-layer porous coating on the way surface significantly increase the damping characteristics of the supports and bearing capacity of the bearing, and reduce the frictional force.

Research Results. A design model of the thrust sliding bearing is formed taking into account the porous coating permeability on the way surface. That is based on the equations of the steady flow of the electrically conductive incompressible liquid lubricant for a "thin layer" in the working gap, continuity and Darcy in the presence of an electromagnetic field. The authors have found the exact self-similar solution to a thrust bearing with a two-layer porous coating on the way surface for the field of velocities and pressures in the lubricating layer and porous coating. Besides, multiparameter expressions for the essential bearing performance with the account for the availability of electromagnetic fields, the permeability of porous layers, and the ratio of the thicknesses of porous layers, are specified.

Discussion and Conclusions. The received updated calculation models have made it possible to determine the effect of a number of additional factors, as well as to perform a comparative analysis

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: murman1963@yandex.ru, Opatskih@yandex.ru, Vm_2@rgups.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

вновь полученных результатов и уже имеющихся, что подтверждает большую приближенность новой модели к реальной практике. Расчетные модели обеспечивают необходимые инженерные проектировочные вычисления в достаточно широком диапазоне скоростей и нагрузок для применения в машиностроении, авиастроении, приборостроении и т.д.

of the newly obtained results and those already available which confirms the close approximation of the new model to the actual practice. The theoretical models provide the necessary engineering design calculations in a sufficiently wide range of speeds and loads for the application in engineering, aircraft building, instrument making, etc.

Ключевые слова: электропроводимость смазочного материала, проницаемость пористых слоев, наклонный ползун и направляющая, двухслойное пористое покрытие направляющей.

Keywords: electrical conductivity of lubricant, permeability of porous layers, inclined slide and guide, two-layer porous guide coating.

Образец для цитирования: Мукутадзе, М. А. Расчетная модель упорного подшипника с пористым покрытием на поверхности направляющей / М. А. Мукутадзе, А. Н. Гармонина, В. М. Приходько // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 70–77.

For citation: M.A. Mukutadze, A. N. Garmonina, V. M. Prikhodko. Design model of thrust bearing with porous coating on the way surface. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, p. 70–77.

Введение. Одним из важных конструктивных элементов подшипников жидкостного трения является смазочная среда. В современных машинах широко используются пористые покрытия, наносимые газотермическим напылением, обладающие более высокой маслоемкостью и демпфирующей способностью. В последнее время в качестве смазочной среды используются жидкости, обладающие электропроводящими свойствами. Анализ существующих работ в данном направлении [1–10], в которых сравнивались характеристики подшипников, работающих на электропроводящих смазочных материалах с пористым покрытием на поверхности направляющей, подтвердил эффект возрастания толщины смазочной пленки по сравнению с подшипниками, работающими на обычных смазочных материалах. Результаты работ, посвященных расчету подшипников скольжения с пористым покрытием из пористых псевдосплавов, подтверждают, что в приведенных расчетах не учитывается многослойность пористых слоев и электропроводность смазочного материала.

Постановка задачи. Рассматривается ламинарное течение электропроводящего жидкого смазочного материала в рабочем зазоре упорного подшипника скольжения с наклонным вкладышем, работающего в режиме гидродинамического смазывания, с двухслойным пористым покрытием на поверхности направляющей. Предполагается, что вкладыш неподвижен, а направляющая движется в сторону сужения зазора с постоянной скоростью u^*. Вектор магнитной индукции $\bar{B}'$ и вектор напряженности электрического поля $\bar{E}'$ направлены так, как показано на рис. 1.

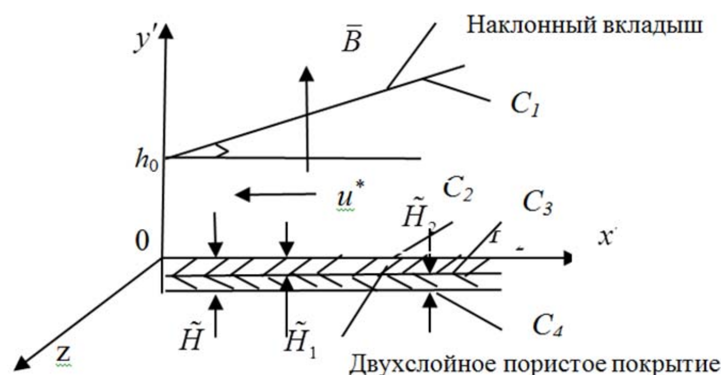


Рис. 1. Рабочая схема

Fig. 1. Functional diagram

В декартовой системе координат уравнения ползуна C_1 и направляющей с двухслойным пористым покрытием на ее поверхности запишем в виде:

$$y' = h_0 + x'tg\alpha\,,\ \ y' = 0\,,\ \ y' = -\tilde{H}\,,\ \ y' = -\tilde{H}_1, \qquad (1)$$

где H_1 — толщина пористого слоя, прилегающего к направляющей; H — толщина двухслойного пористого покрытия; h_0 — толщина смазочной пленки в начальном сечении; α — угол наклона ползуна к оси Ox.

Предполагается, что h_0 значительно меньше длины ползуна.

Исходные уравнения и граничные условия.

Движение электропроводящего жидкого смазочного материала в рабочем зазоре между наклонным ползуном и направляющей описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial^2 v_{x'}}{\partial y'^2} = \frac{1}{\mu'}\frac{dp'}{dx'} - \frac{1}{\mu'}\sigma' B\left(E_z - Bv_{x'}\right), \quad (2)$$

где μ' — вязкость смазочного материала; p' — давление в смазочном слое; σ' — электропроводность смазочного материала; $\bar{B}' = \{0, B_y, 0\}$ — вектор магнитной индукции; $\bar{E}' = \{0, 0, E_z\}$ — вектор напряженности электрического поля; B — составляющая вектора магнитной индукции; E_z — составляющая вектора напряженности электрического поля. При анализе рассматриваемой задачи в качестве исходных уравнений берутся система уравнений (2), а также уравнения неразрывности и Дарси для случая «тонкого слоя».

$$\frac{\partial^2 v_{x'}}{\partial y'^2} = \frac{1}{\mu'}\frac{dp'}{dx'} - \frac{1}{\mu'}\sigma' B\left(E_z - Bv_{x'}\right), \ \frac{\partial v_{x'}}{\partial x'} + \frac{\partial v_{y'}}{\partial y'} = 0, \ \frac{\partial^2 P'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 P'}{\partial y'} = 0, \quad (3)$$

где $v_{x'}, v_{y'}$ — компоненты вектора скорости, P' — давление в пористом слое.

При этом значения $\bar{B}' = \{0, B_y, 0\}$ и $\bar{E}' = \{0, 0, E_z\}$ считаются заданными и удовлетворяющими уравнениям Максвелла:

$$\operatorname{div}\bar{B}' = 0, \quad \operatorname{rot}\bar{E}' = 0.$$

Величины E', B' и скорости течения электропроводящей жидкости таковы, что можно пренебречь влиянием потока на электрическое и магнитное поля.

Система уравнений (3) решается при следующих граничных условиях:

$$v_{x'} = 0, \ v_{y'} = 0 \ \text{при} \ y' = h_0 + x'\operatorname{tg}\alpha; \ v_{x'} = -u^*, \ v_{y'} = 0 \ \text{при} \ y = 0;$$

$$p'(0) = p'(L) = p_a, \ \frac{\partial P_2}{\partial y'^2} = 0 \ \text{при} \ y = -\tilde{H}; -\frac{k_1'}{\mu'}\frac{\partial P_1}{\partial y}\Big|_{y=0} = v_y\Big|_{y=0}, \ p_1 = P \ \text{при} \ y = 0$$

$$p_1 = p_2 \ \text{при} \ y = -\tilde{H}_1; \ \frac{\partial p_1}{\partial y} = \frac{k_2}{k_1}\frac{\partial P_2}{\partial y} \ \text{при} \ y = -\tilde{H}_1. \quad (4)$$

Для описания процессов в смазочном и пористом слоях размерные величины связаны с соответствующими безразмерными следующими соотношениями:

— в смазочном слое:

$$v_{y'} = \varepsilon u^* u, \ v_{x'} = u^* v, \ \varepsilon = \frac{h_0}{L}, \ y = h_0 y', \ x = Lx', \ p = p^* p', \ p^* = \frac{\mu u^* L}{h_0^2}, \ \sigma' = \sigma, \ \mu' = \mu; \quad (5)$$

— в пористом слое:

$$x = Lx^*, \ y = Ly^*, \ P = P^* P', \ k_1' = k_1, \ k_2' = k_2, \ P_1 = P^* P_1, \ P_2 = P^* P_2. \quad (6)$$

Подставляя (5)–(6) в уравнение (3), опуская штрихи при безразмерных переменных, приходим к следующему выражению:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{dp}{dx} + Nv - A, \ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \ \frac{\partial^2 P}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = 0. \quad (7)$$

Здесь $B_y = B = \text{const}$, $E_z = E = \text{const}$, $N = \frac{\sigma' B h_0^2}{\mu' u^*}$ — число Гартмана, $A = \frac{\sigma' B E h_0^2}{\mu' u^*}$ — величина, обусловленная наличием электрического поля.

Система уравнений (7) решается при следующих граничных условиях:

— в смазочном слое:

$$v = 0, \ u = 0 \ \text{при} \ y = 1 + \eta x = h(x), \ v = -1 \ \text{при} \ y = 0, \ p(0) = p(1) = \frac{p_a}{p^*}; \quad (8)$$

— в пористом слое:

$$u\Big|_{y^*=0} = \tilde{M}_1 \frac{\partial P_1}{\partial y^*}\Big|_{y^*=0}, \quad \frac{\partial P_2}{\partial y^*}\Big|_{y^*=-\frac{\tilde{H}}{L}} = 0, \quad p_1 = P \text{ при } y^* = 0;$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial y^*}\Big|_{y^*=-\frac{\tilde{H}_1}{L}} = \frac{k_2}{k_1}\frac{\partial P_2}{\partial y^*}\Big|_{y^*=-\frac{\tilde{H}_1}{L}}, \quad P_1 = P_2\Big|_{y^*=-\frac{\tilde{H}_1}{L}}, \tag{9}$$

где $\eta = \dfrac{Ltg\alpha}{h_0}$, $\tilde{M}_1 = -\dfrac{k_1 L}{h_0^3}$

Заменяя в первом уравнении системы (7) скорость v ее максимальным значением, равным 1, точное автомодельное решение задачи, связанное с определение поля скоростей и давлений в смазочном слое, будем искать в виде:

$$v = \frac{\partial\psi}{\partial y} + V(x,y),\; u = -\frac{\partial\psi}{\partial x} + U(x,y),\; v(x,y) = \tilde{v}(\xi),\, u(x,y) = -\tilde{u}(\xi)h'(x),$$

$$\frac{dp}{dx} - N - A = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)},\, \psi = \tilde{\psi}(\xi),\, \xi = \frac{y}{h(x)}. \tag{10}$$

Подставляя (10) в (7) с учетом граничных условий (8)–(9), получим:

$$\psi''' = \tilde{C}_2,\; \tilde{v}'' = \tilde{C}_1,\; \tilde{u}' + \xi\tilde{v}' = 0,\; \tilde{u} = 0,\; \tilde{v} = 0 \text{ при } \xi = 1,\; \tilde{\psi}' = 0 \text{ при } \xi = 0,\; \xi = 1,$$

$$\tilde{v} = 1 \text{ при } \xi = 0,\; \tilde{u}\Big|_{y^*=0} = \tilde{M}_1 \frac{\partial P_1}{\partial y^*}\Big|_{y^*=0}. \tag{11}$$

Решение задачи (10) с учетом граничных условий (11) находится непосредственным интегрированием:

$$\tilde{v} = \frac{\tilde{C}_1\xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1\xi}{2} + 1\right)\xi + 1,\; \tilde{\psi} = \frac{\tilde{C}_2}{2}\left(\xi^2 - \xi\right). \tag{12}$$

Определение гидродинамического давления

Давление в смазочном слое находим из уравнения:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)} + (N + A). \tag{13}$$

Интегрируя уравнение (13), получим

$$p = \tilde{C}_1\left(x - \eta x^2\right) + \tilde{C}_2\left(x - \frac{3}{2}\eta x^2\right) + (N + A)x + \frac{p_a}{p^*}. \tag{14}$$

Используя граничные условия $p(0) = p(1) = \dfrac{p_a}{p^*}$ и решая уравнение с точностью до членов $O\left(\eta^2\right)$, получим

$$\tilde{C}_2 = -(N + A)\left(1 + \frac{3}{2}\eta\right) - \tilde{C}_1\left(1 + \frac{1}{2}\eta x^2\right). \tag{15}$$

С учетом (15) для p получим следующее выражение:

$$p = \frac{1}{2}\eta\left(x^2 - x\right)\left(3(N + A) + C_1\right) + \frac{p_a}{p^*}. \tag{16}$$

С учетом (16) давление фильтрующегося смазочного материала в пористых слоях будем искать в виде:

$$p_i(x, y^*) = R_i\left(y^*\right) + \frac{1}{2}\eta\left(x^2 - x\right)\left(3(N + A) + \tilde{C}_1\right) + \frac{p_a}{p^*}. \tag{17}$$

Подставляя (17) в уравнение Дарси для определения функции $R_i\left(y^*\right)$, приходим к следующему дифференциальному уравнению и граничным условиям:

$$R_i''\left(y^*\right) + (3(N + A) + \tilde{C}_1)\eta = 0,\quad i = 1,2; \tag{18}$$

$$R_1(0) = 0\;\; R_1\left(-\frac{\tilde{H}_1}{L}\right) = R_2\left(-\frac{\tilde{H}_1}{L}\right),\; R_1'\left(-\frac{\tilde{H}_1}{L}\right) = \frac{k_2}{k_1}R_2'\left(-\frac{\tilde{H}_1}{L}\right),\; R_2'\left(-\frac{H}{L}\right) = 0. \tag{19}$$

Решение задачи (18) с учетом граничных условий (19) находим непосредственным интегрированием. В результате получим:

$$R_1(y^*) = \eta\left(\widetilde{C}_1 + 3(N+A)\right)\left(-\frac{y^*}{2} - y^*\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\widetilde{H}_2}{L} + \frac{\widetilde{H}_1}{L}\right)\right)$$

$$R_2(y^*) = \eta\left(\widetilde{C}_1 + 3(N+A)\right)\left(-\frac{y^{*2}}{2} - y^*\frac{\widetilde{H}}{L} + \frac{\widetilde{H}_1\widetilde{H}_2}{L^2}\left(\frac{k_2}{k_1} - 1\right)\right) \quad (20)$$

Тогда $P_1 = \eta\left(\widetilde{C}_1 + 3(N+A)\right)\left(-\frac{y^{*2}}{2} - y^*\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\widetilde{H}_2}{L} + \frac{\widetilde{H}_1}{L}\right) + \frac{1}{2}\left(x^2 - x\right)\right) + \frac{p_a}{p^*}$

$$P_2 = \eta\left(\widetilde{C}_1 + 3(N+A)\right)\left(-\frac{y^{*2}}{2} - y^*\frac{\widetilde{H}}{L} + \frac{\widetilde{H}_1\widetilde{H}_2}{L^2}\left(\frac{k_2}{k_1} - 1\right) + \frac{1}{2}\left(x^2 - x\right)\right) + \frac{p_a}{p^*}$$

Таким образом, решение задачи будет найдено после определения константы C_1. Интегрируя уравнение неразрывности по ξ от 0 до 1

$$\widetilde{M}\frac{\partial P_1}{\partial y}\bigg|_{y^*=0} = \int_0^1 \widetilde{v}(\xi)d\xi \quad (21)$$

с учетом (12) и (20) для C_1, получим следующее выражение:

$$\widetilde{M}_1\left(3(N+A) + \hat{C}_1\right)\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\widetilde{H}_2}{L} + \frac{\widetilde{H}_1}{L}\right) = -\frac{\widetilde{C}_1}{12} + \frac{1}{2} \quad (22)$$

Решая уравнение (22) относительно C_1, будем иметь:

$$\widetilde{C}_1 = \frac{6\left(1 + 6\widetilde{M}_1(N+A)\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\widetilde{H}_2}{L} + \frac{\widetilde{H}_1}{L}\right)\right)}{1 - 12\widetilde{M}_1\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\widetilde{H}_2}{L} + \frac{\widetilde{H}_1}{L}\right)}, \quad (23)$$

Итак, уравнение (16) с учетом (23) можно представить в виде:

$$P = \frac{1}{2}\eta\left(x^2 - x\right)\left(3(N+A) + \frac{6\left(1 + 6\widetilde{M}_1(N+A)\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\widetilde{H}_2}{L} + \frac{\widetilde{H}_1}{L}\right)\right)}{1 - 12\widetilde{M}_1\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\widetilde{H}_2}{L} + \frac{\widetilde{H}_1}{L}\right)}\right) + \frac{p_a}{p^*}. \quad (24)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Перейдем к определению основных рабочих характеристик подшипника. С учетом (12) и (24) для несущей способности и силы трения получим следующие выражения:

$$W = \frac{\mu u^* L}{h_0^2}\int_0^1\left(P - \frac{p_a}{p^*}\right)dx = \frac{\mu u^* L}{h_0^2}\left(-\frac{(N+A)}{4} + \frac{1 + 6\widetilde{M}(N+A)\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\widetilde{H}_2}{L} + \frac{\widetilde{H}_1}{L}\right)}{\left(24\widetilde{M}_1\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\widetilde{H}_2}{L} + \frac{\widetilde{H}_1}{L}\right) - 2\right)}\right);$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{\mu u^* L}{h_0^2}\int_0^1\left(\frac{\psi''(0)}{h^2(x)} - \frac{\widetilde{v}'(0)}{h^3(x)}\right)dx = \frac{\mu u^* L}{h_0^2}\left(\frac{(N+A)}{2}\left(1 + \frac{\eta}{2}\right) + \frac{\widetilde{C}_1\eta}{2} + 1 - \frac{3}{2}\eta\right). \quad (25)$$

Для проверочных расчетов на основе полученных теоретических моделей использованы следующие их значения:

p_a = 0,08÷0,101325 МПа; $h_0 = 10^{-7}÷2\cdot10^{-6}$ м; L = 0,1256÷0,1884 м;

μ = 0,0608 Нс/м^2; u^* = 1÷3 м/с; A = 0,1÷2; N =0,1÷0,9; p = 0÷16 МПа;

η = 0,3÷1; $\frac{k_2}{k_1}$ = 0,1÷0,9; H_2 / H_1 = 0,5÷2.

Результаты численных расчетов приведены на рисунках 2–5.

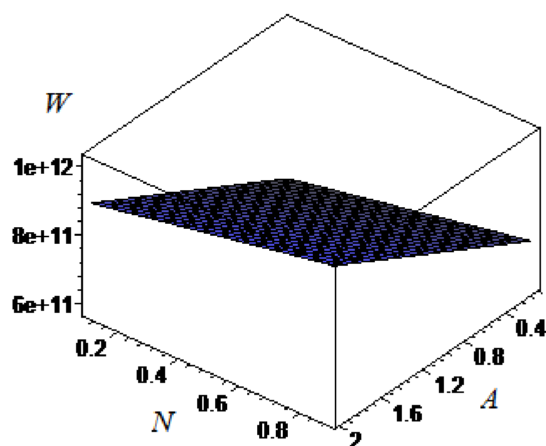


Рис. 2. График зависимости несущей способности от параметра *A*, обусловленного наличием электрического поля и *N*, числа Гартмана

Fig. 2. Dependency graph of bearing capacity on A parameter due to the presence of electric field and N, Hartmann number

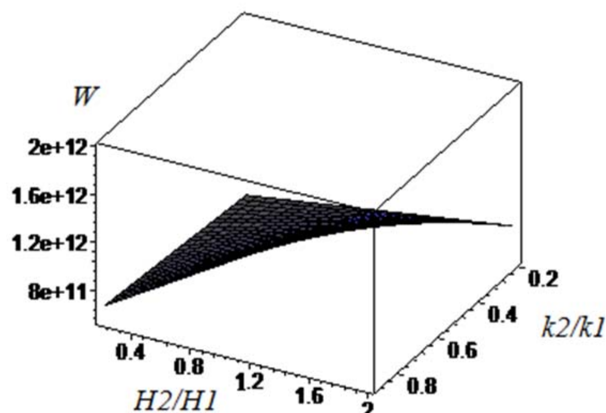


Рис. 3. График зависимости несущей способности от (k_2/k_1) отношения проницаемости пористых слоев и (H_2/H_1) отношение толщины пористых слоев

Fig. 3. Dependency graph of bearing capacity on (k_2/k_1) penetrability ratio of porous layers and (H_2/H_1) ratio of porous layers thickness

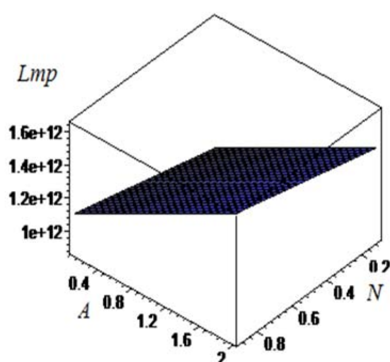


Рис. 4. График зависимости силы трения от параметра (*A*), обусловленного наличием электрического поля и (*N*) числа Гартмана

Fig. 4. Dependency graph of friction force on (A) parameter due to the presence of electric field and (N), Hartmann number

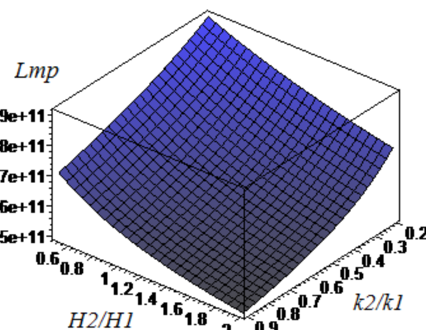


Рис. 5. График зависимости силы трения от (k_2/k_1) отношения проницаемости пористых слоев и (H_2/H_1) отношения толщины пористых слоев

Fig. 5. Dependency graph of friction force on (k_2/k_1) penetrability ratio of porous layers and (H_2/H_1) ratio of porous layers thickness

Выводы. Численный анализ полученных расчетных моделей и построенных на его основе графиков для упорного подшипника скольжения с двухслойным покрытием на поверхности направляющей позволил установить:

1. Подшипники с двухслойным покрытием на поверхности направляющей значительно повышают демпфирующие характеристики опор и несущую способность подшипника с увеличением отношения проницаемости пористых слоев (k_2/k_1) и толщины пористых слоев (H_2 / H_1), при этом сила трения существенно уменьшается.

2. Существенный рост несущей способности (≈2,5 раза) наблюдается при варьировании величины числа Гартмана *(N)*, так же, как и величины (*A*,) обусловленной наличием электрического поля.

3. С увеличением величины числа Гартмана *(N)* и величины *(A),* обусловленной наличием электрического поля, сила трения остается практически неизменной.

Библиографический список

1. Лагунова, Е. О. Нелинейные эффекты воздействия электропроводящей смазки на шип подшипника, обладающего демпфирующими свойствами / Е. О. Лагунова, А. Н. Гармонина, Е. А. Копотун // Сборка в машиностроении и приборостроении. — 2016. — № 3. — С. 40–46.

2. Гармонина, А. Н. Расчетная модель электропроводящей смазки радиального подшипника с демпфирующими свойствами при наличии электромагнитных полей / А. Н. Гармонина // Вестник РГУПС. — 2015. — № 3. — С. 121–127.

3. Akhverdiev, K.S. Radial bearing with porous barrel / K.S. Akhverdiev, M.A. Mukutadze, A.M. Mukutadze // Proceedings of Academic World : International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. — IRAG Research Forum : Institute of Research and Journals, 2016. — P. 28–31.

4. Разработка расчетной модели радиального подшипника с учетом зависимости проницаемости, электропроводности и вязкости жидкого смазочного материала от давления / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, И. А. Колобов, А. Н. Гармонина // Науковедение. — 2016. — Т.8, № 6. — С.1–18.

5. Mukutadze, A.M. Coefficient of a rolling motion bearing drive / A.M. Mukutadze // Procedia Engineering. — 2016. — No. 150. — P. 547–558.

6. Akhverdiev, K.S. Damper with porous anisotropic ring / K.S. Akhverdiev, A.M. Mukutadze // Mechanical Engineering Research. — 2016. — Vol. 6, No. 2. — P. 1–10.

7. Akhverdiev, K.S. Research of Drive Factor of Damper with Doble-Layer Porous Ringwith Compound Feed of Lubricant Material / K.S. Akhverdiev, A.M. Mukutadze // International Journal of Engineering Research. — 2017. — No. 1 — P. 76–85.

8. Mukutadze, M.A. Radial bearings with Porous Elements / M. A. Mukutadze // Procedia Engineering. — 2016. — No. 150. — P. 559–570.

9. Демпфер с пористым элементом для подшипниковых опор / К.С. Ахвердиев, А.М. Мукутадзе, Н.С. Задорожная, Б.М. Флек // Трение и износ. — 2016. — Т. 37, № 4. — С. 502–509.

10. Расчетная модель составного цилиндрического подшипника, работающего в устойчивом режиме, при неполном заполнении смазочным материалом зазора / К. С. Ахвердиев, Н. С. Задорожная, А. М. Мукутадзе, Б. М. Флек // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2016. — № 3. — С. 64–69.

References

1. Lagunova, E.O., Garmonina, A.N., Kopotun, E.A. Nelineynye effekty vozdeystviya elektroprovodyashchey smazki na ship podshipnika, obladayushchego dempfiruyushchimi svoystvami. [Nonlinear action effects electrically conductive lubricant on the bearing spike possessing damping properties.] Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making, 2016, no. 3, pp. 40–46 (in Russian).

2. Garmonina, A.N. Raschetnaya model' elektroprovodyashchey smazki radial'nogo podshipnika s dempfiruyushchimi svoystvami pri nalichii elektromagnitnykh poley. [Computational model of electrical conductive grease radial bearing with damping properties in existence of electromagnetic fields.] Vestnik RGUPS, 2015, no. 3, pp. 121–127 (in Russian).

3. Akhverdiev, K.S., Mukutadze , M.A., Mukutadze, A.M. Radial bearing with porous barrel. Proceedings of Academic World: International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. IRAG Research Forum: Institute of Research and Journals, 2016, pp. 28–31.

4. Akhverdiev, K.S., Mukutadze , M.A., Kolobov, I.A., Garmonina, A.N. Razrabotka raschetnoy modeli radial'nogo podshipnika s uchetom zavisimosti pronitsaemosti, elektroprovodnosti i vyazkosti zhidkogo smazochnogo materiala ot davleniya. [Development of design model of a radial bearing taking into account dependence of permeability, electrical conductivity and viscosity of liquid lubricant on pressure.] Naukovedenie, 2016, vol. 8, no. 6, pp.1–18 (in Russian).

5. Mukutadze, A.M. Coefficient of a rolling motion bearing drive. Procedia Engineering, 2016, no. 150, pp. 547–558.

6. Akhverdiev, K.S., Mukutadze, A.M. Damper with porous anisotropic ring. Mechanical Engineering Research, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 1–10.

7. Akhverdiev, K.S., Mukutadze, M.A. Research of Drive Factor of Damper with Doble-Layer Porous Ringwith Compound Feed of Lubricant Material. International Journal of Engineering Research, 2017, no. 1, pp. 76–85.

8. Mukutadze, M.A. Radial bearings with Porous Elements. Procedia Engineering, 2016, no. 150, pp. 559–570.

9. Akhverdiev, K.S., Mukutadze, A.M., Zadorozhnaya, N.S., Fleck, B.M. Dempfer s poristym elementom dlya podshipnikovykh opor. [Damper with a porous element for bearing assemblies.] Friction and Wear, 2016, vol. 37, no. 4, pp. 502–509 (in Russian).

10. Akhverdiev, K.S., Zadorozhnaya, N.S., Mukutadze, A.M., Fleck, B.M. Raschetnaya model' sostavnogo tsilindricheskogo podshipnika, rabotayushchego v ustoychivom rezhime, pri nepolnom zapolnenii smazochnym materialom zazora. [Computation model of composite cylindrical bearing working in steady-state regime for partial filling of gap with lubricant material.] Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016, no. 3, pp. 64–69 (in Russian).

Поступила в редакцию 07.07.2017
Сдана в редакцию 07.07.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 07.07.2017
Submitted 07.07.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Мукутадзе Мурман Александрович,
доцент кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), доктор технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2810-3047
murman1963@yandex.ru

Гармонина Анастасия Николаевна,
соискатель кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7370-4012
Opatskih@yandex.ru

Приходько Виктор Маркович,
заведующий кафедрой «Начертательная геометрия и графика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0907-9320
Vm_2@rgups.ru

Authors:

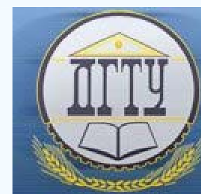
Mukutadze, Murman A.,
associate professor of the Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Dr.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2810-3047
murman1963@yandex.ru

Garmonina, Anastasia N.,
Ed D candidate of the Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Dr.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7370-4012
Opatskih@yandex.ru

Prikhodko, Victor M.,
head of the Descriptive Geometry and Engineering Graphics, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0907-9320
Vm_2@rgups.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-83: 621.865.8. 005. 571.11 10.23947/1992-5980-2017-17-3-78-88

Управляемая вибрация звеньев подвижности производственного механизма*

Н. Ф. Карнаухов[1], М. Н. Филимонов[2], Р. С. Мироненко[3]**

[1, 2, 3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Controllable vibration of mobility links of production mechanism***

N. F. Karnaukhov[1], M. N. Filimonov[2], R. S. Mironenko[3]**

[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Предметом настоящей работы является исследование характеристик трения движущихся поверхностей звеньев производственных механизмов (ПМ), включая исполнительные механизмы (ИМ), рабочие органы (РО) технологических машин (ТМ) в зоне малой частоты вращения асинхронного двигателя (АД), питаемого от автономного инвертора напряжения (АИН) в системе «АИН — АД». Цель исследования — поиск технического решения по снижению влияния трения в звеньях ПМ на механические характеристики частотно-управляемого электропривода (ЧУЭП) в зоне малой и ползучей скорости, а также подтверждение целесообразности введения нормируемой вибрации подвижных звеньев в направляющих ПМ при реализации пускотормозных режимов работы АД.

Материалы и методы. Для решения поставленных исследовательских задач применен принцип двухрежимного управления АИН, обеспечивающего формирование квазисинусоидального напряжения для питания АД в системе «АИН — АД» с коэффициентами гармоник $K_u < 8\%$ и $K_u > 8\%$. Использовано программное регулирование амплитуд основной, 5-й и 7-й гармоник тока статора, формирующих пульсирующие моменты на валу АД и вызывающих нормируемую вибрацию звеньев ПМ.

Результаты исследования. Получено обоснование и экспериментальное подтверждение возможности управления АИН, обеспечивающее программное изменение амплитуды вибрации вала АД и уменьшение эффективного коэффициента трения движущихся звеньев ПМ с целью исключения схватывания звеньев в условиях эксплуатации ПМ. Такой эффект возможен при вращении ротора АД в зоне низких частот тока (0,5–20 Гц), что характерно для движения ПМ с малой скоростью в процессе реализации пускотормозных режимов работы ЧУЭП.

Обсуждение и заключения. Область применения разработанного технического решения охватывает многие ПМ с ЧУЭП, для которых повторно-кратковременные режимы работы (с ПВ 40 % и более) являются основными. Таким образом, использование эффекта вибрационной линеаризации коэффициента трения в звеньях ПМ позволяет уменьшить напряжение трогания АД и существенно расширить диапазон регулирова-

Introduction. The work subject is investigating friction characteristics of the moving surfaces of the production mechanism (PM) links including executive mechanisms (EM), and work tools (WT) of technological machines (TM) in the low-speed zone of an asynchronous motor (AM) powered from an autonomous voltage inverter (AVI) in the “AVI – AM” system. The work objective is to find a technical solution to the reduction of the friction effect in the PM links on the frequency-controlled drive (FCD) mechanical characteristics in the low- and creep-speed zone, and also, to the validation of the rated vibration feasibility of the mobile links in the PM guides under the starting-braking AM modes.

Materials and Methods. To solve the research problems, the concept of bimodal AVI control that provides the formation of quasi-sinusoidal voltage for AM power supply in the “AVI – AM” system with the harmonic coefficients $K_u < 8\%$ and $K_u > 8\%$ is used. The program control of the amplitudes of the fundamental 5th and 7th harmonics of the stator current is applied. These harmonics form the fluctuating torques on the AM shaft and cause the normalized vibration of the PM links.

Research Results. The justification and experimental proof of the AVI control feasibility providing a project change in the AM shaft vibration amplitude and a decrease in the effective friction coefficient of the PM moving links aiming at the elimination of the seizure of the links under the PM operation conditions are obtained. Such an effect is possible under the AM rotor spinning in the low current frequency (0.5-20 Hz) zone which is typical for the slow-speed motion of PM under the starting-braking FCD modes.

Discussion and Conclusions. The application domain of the developed technical solution covers many PMs with FCD for which the short-time operation modes (with CY of 40% and more) are considered basic. Thus, the use of the effect of vibration linearization of the friction coefficient in the PM links allows the following: to reduce the AM breakaway voltage and significantly extend the

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: nika811@bk.ru, maxfil2006@yandex.ru, rmironenko@donstu.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

ния скорости ЧУЭП, повысить плавность движения и улучшить кинематику выходного звена ПМ, на котором установлен рабочий орган (РО).

FCD speed control range, to increase the ride quality and improve the PM out put link kinematics on which the WT is fixed.

Ключевые слова: частотно-управляемый электропривод, двухрежимный автономный инвертор напряжения, коэффициент гармоник тока, напряжение трогания АД, сила трения покоя и движения, эффективный коэффициент сухого трения, колебания звеньев механической системы.

Keywords: frequency-controlled electric drive, double-sided autonomous voltage inverter, current harmonics coefficient, AM breakaway voltage, static and dynamic friction force, effective dry friction coefficient, vibrations of mechanical system links.

Образец для цитирования: Карнаухов, Н. Ф. Управляемая вибрация звеньев подвижности производственного механизма / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Р. С. Мироненко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 78–88.

For citation: N.F. Karnaukhov, M.N. Filimonov, R.S. Mironenko. Controllable vibration of mobility links of production mechanism. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 78–88.

Введение. При проектировании производственных механизмов (ПМ) особое значение придается выбору (созданию) электропривода (ЭП), обеспечивающего энергосберегающие режимы работы элементов силового канала и необходимые механические характеристики, количественные значения которых обычно выражаются параметрами траектории, скоростями, ускорениями и силами (моментами сил) [1], действующими при работе ПМ. Расчетная модель ЭП ПМ с жесткими звеньями и направляющими движения приведена на рис. 1.

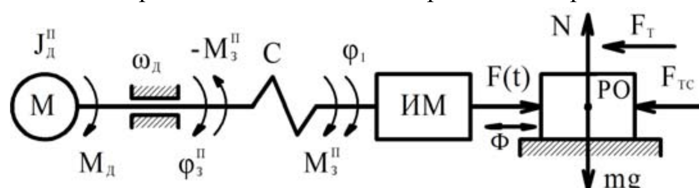


Рис. 1. Расчетная модель электропривода производственного механизма с жесткими звеньями и направляющими движения: $J_Д^П$ — приведенный момент инерции передаточного механизма и двигателя; $M_Д$ — момент двигателя; $\omega_д$ — скорость вращения ротора асинхронного двигателя (АД); C — жесткость соединения механизма; $M_З^П$ — движущий момент на входе ИМ на валу АД; $M_З^П$ — момент сопротивления на валу АД; φ_1 — угол поворота входного звена ИМ; $F(t)$ — суммарная движущая сила; $F_т$ — сила трения в направляющих; $F_{тс}$ — сила технологического сопротивления; N — сила нормального давления массы m рабочего органа (РО)

Fig. 1. Design model of electric drive of production mechanism with rigid links and motion guides: $J_Д^П$ — reduced moment of inertia of transfer device and motor; $M_Д$ — motor torque; $\omega_д$ — asynchronous motor (AM) rotor speed; C — rigidity of the mechanism connection; $M_З^П$ — driving moment at EM input on AM shaft; $M_З^П$ — torque on AM shaft; φ_1 – roll angle of EM input unit; F(t) — total driving force; F_m — frictional force in guides; F_{mc} — process drag force; N — normal pressure force of work tool (WT) mass m

Как известно [2, 3, 4], к ПМ с позиционным ЭП постоянного, переменного тока обычно предъявляются повышенные требования (в частности, к равномерности движения исполнительного механизма (ИМ) и точности позиционирования РО). Это обусловлено особенностями формирования механических характеристик исполнительного двигателя (М) в зоне малой и ползучей скорости с учетом влияния сил сухого трения в подвижных звеньях.

В этом случае применение частотно-управляемого электропривода (ЧУЭП) на базе АД, собранного по системе «АИН—АД», сопряжено с дополнительными трудностями. Они вызваны появлением на валу АД пульсирующих моментов [5], обусловленных гармоническими составляющими тока статора (при частотах 0,5–20 Гц и коэффициенте гармоник $K_u > 8$ %). В результате их воздействия возникают значительные биения ведущего вала, неравномерность вращения и формируется линейная скорость (v) движения РО. Такие режимы работы характерны для подавляющего большинства технологического оборудования (ТО): станочных и робототехнических систем РТС — с малой зоной перемещения ИМ, РО, например, захватного устройства (ЗУ) промышленного робота (ПР) [6].

Наличие пульсирующих моментов на валу АД в совокупности с моментом сухого трения в звеньях подвижности ПМ затрудняет реализацию программируемых законов управления движением выходного звена, что снижает качество выполнения технологического процесса, точность останова РО. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, результирующие динамические и статические характеристики ЧУЭП в значительной степени зависят от случайных значений сухого трения в механических звеньях ПМ. Особенно это проявляется в зоне малых частот вращения АД. Естественно, проблемы повышения равномерности движения, точности позиционирования

РО и снижения потерь в зоне контакта (трущихся звеньев в направляющих ПМ и звена подвижности при малой скорости их перемещения) являются достаточно сложными задачами в создании особого класса машин-автоматов — промышленных роботов (ПР). Соответствующие технические решения, по мнению авторов, позволят улучшить технические характеристики ЧУЭП и расширить сферу применения ПМ с приемлемыми механическими характеристиками АД в зоне малой и ползучей скорости, а также в зоне малых перемещений РО.

Цель исследования — показать целесообразность использования двухрежимного управления АИН в ЧУЭП ПМ, проектируемых по системе «АИН—АД», и возможность полезного применения 5-й и 7-й гармоник тока статора АД для улучшения динамики движения ПМ в зоне малой скорости. Программное регулирование гармоник по амплитуде, фазе для формирования приемлемой вибрации ротора при пускотормозных режимах работы АД позволит обеспечить желаемое изменение влияния коэффициента трения в контактирующих поверхностях направляющих и звена подвижности в планируемой зоне перемещения и останова ПМ (в соответствии с параметрами технологического процесса).

Решение задачи. Решение поставленной задачи авторы видят в двухрежимном управлении АИН [6], обеспечивающем формирование синусоидального ($K_u \le 5$–8%) и квазисинусоидального ($K_u > 8\%$) напряжения [7, 8, 9]. Это позволит программно формировать управляемые по амплитуде вращающие моменты (без пульсаций и с нормируемыми пульсациями) на валу АД — например, в процессе пуска — торможения ЧУЭП.

Известно [5], что при питании АД от АИН с несинусоидальным выходным напряжением последний можно разложить на основную составляющую и ряд высших гармоник. При этом основная составляющая тока статора формирует вращающий момент АД, а высшие гармоники создают пульсирующие моменты, определяемые из выражения [10]:

$$M_k = \frac{pm_1}{2\pi k f_1} I_{2k}^2 \frac{r_{2k}}{s_k}, \tag{1}$$

где M_k — пульсирующая составляющая момента от гармоники k-го порядка; p — число пар полюсов АД; m_1 — число фаз статора; $I_{2к}$ — активная составляющая тока ротора; r_{2k} — активное сопротивление обмотки ротора АД; s_k — скольжение k-й гармоники.

Параметры скольжения k-й гармоники могут быть определены из выражения:

$$s_k = [(k \pm 1) \pm s]/k, \tag{2}$$

где верхние знаки относятся к гармоникам прямой, а нижние — к гармоникам обратной последовательности тока статора АД; s — скольжение при пуске — торможении АД, отличающееся от номинального значения.

Следует отметить, что переменные составляющие момента АД от гармоник вызывают изменение частоты вращения ротора при низких частотах тока статора в виде рывков (вибрации или шагов), снижают диапазон регулирования частоты вращения вала АД. В этом случае пульсирующие моменты M_k в составе момента $M_З^П$ можно принять за внешние [11, 12, 13], что для случая трогания АД (начала движения РО) позволяет записать:

$$M_З^П \approx M_C^П, \tag{3}$$

где $M_C^П$ — приведенный к валу входного звена ИМ момент сопротивления, зависимый от суммарной силы $F\Sigma$ (технологического сопротивления $F_{тс}$ и трения покоя $F_{тп}$) подвижного звена в направляющих (рис. 2). Причем значение $M_C^П$ можно определить из соотношения:

$$M_C^П = F_\Sigma \cdot i_2, \tag{4}$$

где i_2 — передаточное отношение скорости точки приложения сил ($F_{тс} + F_{тп}$) к скорости входного звена.

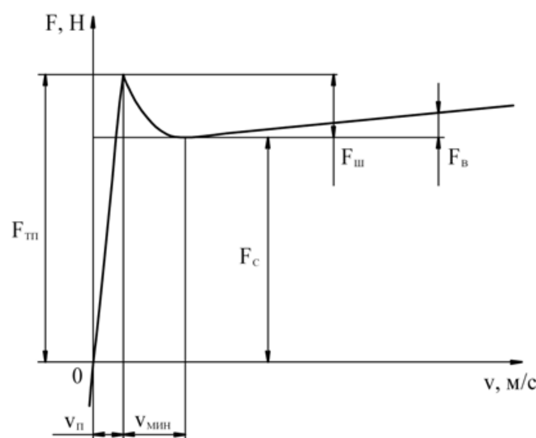


Рис. 2. Изменение силы трения вблизи нулевой (линейной) скорости движения звена в направляющих исполнительного механизма

Fig. 2. Change in frictional force near zero (linear) speed of link in actuator guides

Из рис. 2 следует, сила Fтп в начале трогания ИМ (или при смене направления движения — реверсировании АД) может быть представлена соотношением:

$$F\text{тп} = F\text{ш} + F\text{с} \approx F\text{т}, \qquad (5)$$

где $F_Ш$ — сила трения Штрибека; $F_С$ — сила сухого трения; $F_Т$ — текущее значение силы трения.

При рассмотрении электромеханической системы (ЭМС, см. рис. 1), состоящей из двигателя (М) и исполнительного механизма ИМ, включая РО, приняты условия: система имеет жесткие звенья и одну степень подвижности.

Угол поворота ротора двигателя φд и приведенный к валу двигателя угол $\phi_З^П$ поворота входного звена ИМ принимаются за обобщенные координаты и находятся в соотношении [14]:

$$\phi_З^П = \phi_1 \frac{\omega_1}{\omega_Д} = \phi_1 i_1, \qquad (6)$$

где ω_1, $\omega_д$ — скорости вращения ротора двигателя и входного вала ИМ; i_1 — передаточное отношение скоростей точек механизма.

Движущий момент $M_З^П$ на входе звена ИМ определяется из выражения:

$$M_З^П = c\left(\phi_Д - \phi_1 i_1\right) + \mu\left(\phi'_Д - \phi'_1 i_1\right), \qquad (7)$$

где c, μ — коэффициенты жесткости и вязкого внутреннего трения между массами ведущего и ведомого валов.

При этом соотношение для динамического момента трогания АД можно записать в виде:

$$J_Д^П \frac{d\omega}{dt} = M_Д - \left(M_З^П + M_С^П\right). \qquad (8)$$

С учетом выражений (3) и (5), когда сила трения покоя Fтп в условиях эксплуатации ПМ может изменяться [14] в широком диапазоне, т. е. $F_{тп}/F_с \approx (0{,}1\ldots2{,}5)$, необходимое значение внешней суммарной движущей силы $F(t)$ для РО должно соответствовать соотношению $F(t) > F_{тп}$. С целью улучшения работы ПМ с ЧУЭП авторами статьи предложено использовать вибрацию ротора АД (в пределах допустимых значений по ГОСТ 20815, МЭК 60034-14) для условной компенсации силы Fтп. Такое соотношение действующих сил в контактной зоне направляющих ИМ можно обеспечить за счет управляемых по амплитуде пульсирующих моментов на валу АД, создаваемых гармоническими составляющими тока статора (при частотах 0,5–20 Гц [7] в системе «АИН — АД») в зоне малой и ползучей скорости движения ИМ.

Исследования [15] показывают, что характер зависимости силы трения покоя Fтп от скорости (V) перемещения звена подвижности различен и его следует рассматривать на примере неразрывной функции (см. рис. 2). Характер изменения силы трения $F_{тп}$ наиболее полно отражает физические процессы в механическом контакте, распределенном в плоскости между телами — подвижными звеньями ПМ на малом участке скорости, где $V \to 0$. Здесь сила трения изменяется линейно и пропорционально скорости [8] с коэффициентом Fтп/Vп, где Vп — пороговая скорость, значение которой при расчетах и моделировании обычно принимается 10^{-4}–10^{-6} м/с.

Характеристика Штрибекова трения $F_Ш$ имеет отрицательный наклон в диапазоне низких скоростей ($V_{мин}$ – Vп) относительного перемещения трущихся тел. Сумма сил Fш + Fс на границе диапазона (0 – $V_п$) малой скорости (или в окрестности линейной нулевой скорости) образует силу трения покоя Fтп (силу трения срыва [16]).

Для нарушения состояния относительного покоя твердого тела (в соединениях направляющих движения) часто используют вибрации тела, обеспечиваемые внешней приложенной силой $F(t) > F_{тп}$. Для приближенной оценки влияния вибрации на систему с трением используют эффективный коэффициент сухого трения (Kэф), определяемый отношением минимального значения приложенной силы P_* (из соотношения $F(t) > P_* \geq F$тп) к нормальной реакции N, создаваемой массой РО, т. е.:

$$K_{эф} = \frac{P_*}{N}. \qquad (9)$$

Такое соотношение сил в направляющих ИМ можно сохранить за счет продольной (внешней) силы Ф = Фо·sin(ωt), создаваемой пульсирующими составляющими момента $M_З^П$, что позволяет обеспечить управляемую по амплитуде Фо и частоте $\omega = 2\pi f$ вибрацию [11, 13] звена подвижности ИМ, например, РО (рис. 1).

Если в какой-то момент времени значение суммы приложенной силы P_* и вибрационной составляющей Ф внешней силы $F(t)$ становится меньше предельной силы трения покоя, т. е.:

$$P_* + \Phi_0 \sin\left(\omega t\right) \leq f_0 N, \qquad (10)$$

тело будет находиться в состоянии покоя.

При (sin(ωt) = 1) в выражении (10) составляющая силы $\Phi = \Phi_о \cdot \sin(\omega t)$ достигает максимального значения, состояние покоя нарушается и тело приходит в движение. Тогда:

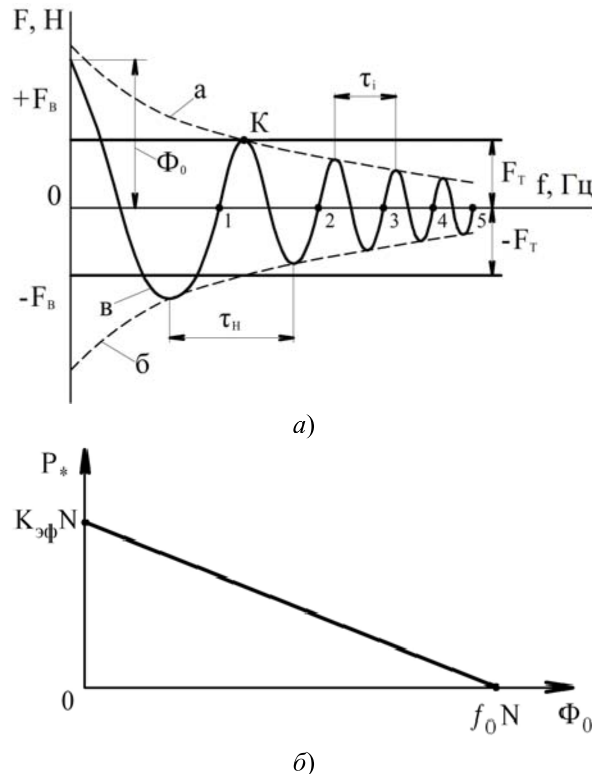
$$P_* = f_0 N - \Phi_0, \quad (11)$$

где f_0 — пороговый коэффициент трения взаимодействующих звеньев — плоскостей ПМ.

С учетом (11) выражение (9), определяющее значение $K_{эф}$ для случая продольной вибрации тела в направляющих (см. рис. 1), можно записать в виде:

$$K_{эф} = \frac{P_*}{N} = f_0 \left(1 - \frac{\Phi_0}{f_0 \cdot N}\right). \quad (12)$$

Из (12) следует, что с увеличением $\Phi_о$ (рис. 3, *а*) значение эффективного коэффициента $K_{эф}$ уменьшается (рис. 3, *б*).



а)

б)

Рис. 3. К оценке минимального значения эффективного коэффициента трения от амплитуды вибрации звена подвижности ПМ

Fig. 3. To estimation of minimum value of effective friction coefficient of vibration amplitude of PM mobility unit

Если амплитуда Φ_0 превышает предельную силу трения, т. е. $\Phi о > f_0 \cdot N$, то рассматриваемое звено подвижности РО приходит в движение условно при измененном коэффициенте трения ($K_{эф} \to 0$) за счет вибрации. Такие условия могут быть созданы при управлении амплитудами 5-й и 7-й гармоник тока статора АД, а также при изменении частоты от 5 до 0,5 Гц (кривая *в*, рис. 3, *а*) и периода колебаний от T_i до $T_н$. Мгновенное значение Φ_i гармоники *в* тока статора АД (регулируемой частоты f) определяется условно в пределах граничных (экспоненциальных) линий *а* и *б*, изменяемых по знаку и значению соответственно выражению $\Phi_i = \pm\Phi_0 \cdot e^{-n \cdot \tau_i}$.

Состояние измененного коэффициента трения ($K_{эф}$) в системе зависит от момента достижения соотношения $F(t) \geq F_{тп}$, что соответствует точке K (см. рис. 3, *а*). Интенсивность регулирования значения Φ_i зависит также от программируемого числа n (из диапазона 1…10) колебаний гармоник амплитудой $\Phi_i > F_{тп}$ рассматриваемой частоты f тока статора.

На рис. 3 показано, что при частоте тока статора $f \approx 1$ Гц пульсирующий момент M_v на валу АД от 5-й гармоники превышает момент срыва, т. е. $M_v \geq M_{тп}$, и движение звена ИМ переходит в зону вязкого трения (левее точки K), где действует уже дополнительная сила $(\pm F_в) > (\pm F_т)$. Вынужденные колебания выходного звена ПМ, обусловленные наложением электромагнитных моментов (от гармоник тока статора и момента силы трения $F_{тп}$) на основной момент АД, создаваемый первой гармоникой, обычно сопровождаются сложными вибрационными процессами в механических системах ПМ. Их анализ и частичное решение приведены в [11, 17, 18].

Введение условной величины $K_{эф}$ с целью оценки влияния вибрации на изменение момента трогания $M_{тп}$ позволяет определить особенности движения звена подвижности ПМ в зоне малой скорости (0–$V_п$) применительно к ЧУЭП.

Исследования и экспериментальная проверка предлагаемого технического решения проводились на стенде (рис. 4), структурная схема которого приведена на рис 5.

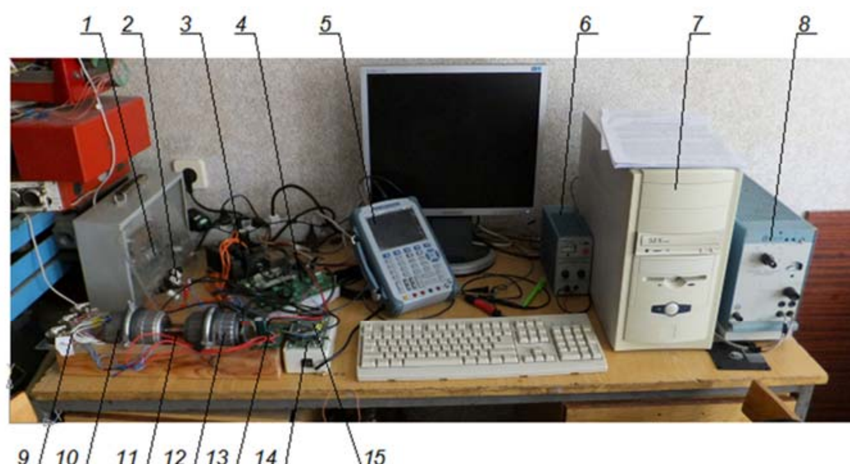


Рис. 4. Общий вид экспериментального стенда: 1 — блок питания 2 (БП2); 2 — датчик тока (ДТ); 3 — АИН1; 4 — микропроцессорная система; 5 — портативный осциллограф (ПК2); 6 — блок питания 3 (БП3); 7 — персональный компьютер (ПК1); 8 — блок питания 1 (БП1); 9 — токосъемные резисторы для измерения токов АД2; 10 — асинхронный двигатель (АД2); 11 — жесткая муфта; 12 — асинхронный двигатель (АД1); 13 — АИН2; 14 — детектор фаз (ФД); 15 — генератор (Г)

Fig. 4. General form of test bench: 1 — power source 2 (PS2); 2 — current sensor (CS); 3 — AVI1; 4 — microprocessor system; 5 — portable oscilloscope (PO 2); 6 — power source 3 (PS 3); 7 — personal computer (PC 1); 8 — power source 1 (PS 1); 9 — current-collecting resistors for AM 2 current measurements; 10 — asynchronous motor (AM 2); 11 — rigid coupling; 12 — asynchronous motor (AM 1); 13 — AVI 2; 14 — phase detector (PD); 15 — generator (G)

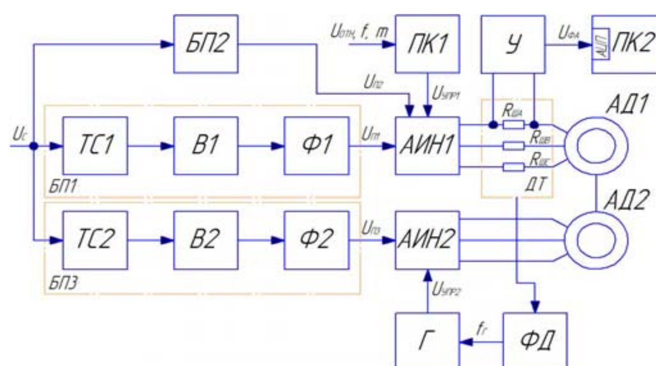


Рис. 5. Структурная схема экспериментального стенда: ТС1, ТС2 — силовые трансформаторы; БП1, БП3 — блоки питания сетевого напряжения $U_С$; В1, В2 — неуправляемые выпрямители; Ф1, Ф2 — (*LC*-фильтры с коэффициентом пульсаций напряжения не более ± 0,05 %); ПК1 — персональный компьютер с программно-аппаратным обеспечением для формирования сигналов управления *IGBT*-ключами (или *MOSFET*-ключами) АИН1; Г — генератор формирования сигнала $U_{УПР2}$ для управления АИН2; ФД — детектор фазы 5-й и 7-й гармоник тока статора АД2; АИН1, АИН2 — автономные инверторы напряжения с соответствующими напряжениями питания $U_{П1}$, $U_{П3}$ и управления $U_{УПР1}$ (с выхода ПК1), $U_{УПР2}$ с выхода Г для реализации вибрации АД2; БП2 — блок питания логических элементов; $R_{ША}$, $R_{ШB}$, $R_{ШC}$ — измерительные шунты токов фаз *A*, *B*, *C* статора асинхронного двигателя АД1 (АИР-50 А2) с короткозамкнутым ротором; АД2 — вспомогательный АД (АИР-50 А2); У — широкополосный усилитель (0,1 – 3000 Гц с пропуском 40-й гармоники при коэффициенте искажения не более ±0,05 %); ПК2 — персональный компьютер с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и специализированным программным обеспечением, предназначенный для математической обработки аналоговых сигналов, на входы АЦП которого подается напряжение $U_{ФА}$ с выхода У, пропорциональное току фазы А статора АД1

Fig. 5. Block scheme of test bench: TC1, TC2 — power transformers; БП1, БП3 — supply units of circuit voltage U_C; B1, B2 — uncontrolled rectifiers; Ф1, Ф2 — (LC-filters with voltage ripple factor no more than ± 0.05%); ПК1 — personal computer with firmware for generating control signals for IGBT-keys (or MOSFET-keys) of АИН1; Г — signal generator $U_{УПР2}$ for controlling АИН2; ФД — phase detector of the 5th and 7th harmonics of stator current АД2; АИН1, АИН2 — autonomous voltage inverters with corresponding supply voltages $U_{П1}$, $U_{П3}$ and control $U_{УПР1}$ (from the output of ПК1), $U_{УПР2}$ from the output Г to realize vibration АД2; БП2 — power supply unit of logic elements; $R_{ША}$, $R_{ШB}$, $R_{ШC}$ — instrument shunts of phase currents A, B, C of asynchronous motor stator АД 1 (АИР-50 А2) with cage rotor; АД 2 — auxiliary АД (АИР -50 А2); У — broadband amplifier (0.1 - 3000 Hz with gap in 40th harmonic at distortion factor of not more than ± 0.05%); ПК 2 — personal computer with analog-to-digital converter (АЦП) and specialized software designed for mathematical processing of analog signals, to which inputs АЦП, $U_{ФА}$ voltage is supplied from output У, proportional to stator phase current A of stator АД1

Оценка влияния вибрации на изменение эффективного коэффициента трения проводилась по измеренному значению напряжения трогания АД в режиме m–подмодуляции работы АИН [4, 6, 19]. Коэффициенты подмодуляции напряжения принимались: $m = 1$ (при вибрации) и $m = 4$ (без вибрации).

Исследования показали, что амплитуды колебательных моментов (которые для 5-й и 7-й гармоник и $K_u \approx$ 5–7 % соответственно составляют 7–20 % от $M_н$) изменяются пропорционально значениям K_u и остаются постоянными при малых нагрузках и частотах, вызывая неравномерность вращения ротора АД.

В результате эксперимента [20, 21] подтверждено влияние вибрации ротора АД на эффективный коэффициент Kэф трения. Это вытекает из анализа полученных зависимостей $\{U^*_т(f)\}$ для режимов:

— с подмодуляцией (на рис. 6, *а* кривые 1 при $M_{СТ} = 0{,}1 \cdot M_Н$; 3 при $M_{СТ} = 0{,}3 \cdot M_Н$; 5 при $M_{СТ} = 0{,}5 \cdot M_Н$ и $m = 4$);

— без подмодуляции (кривые 2 при $M_{СТ} = 0{,}1 \cdot M_Н$; 4 при $M_{СТ} = 0{,}3 \cdot M_Н$; 6 при $M_{СТ} = 0{,}5 \cdot M_Н$ и $m = 1$).

Здесь $U^*_т = U_т/U_{тс}$ — значение относительного напряжения трогания АД, $M_{СТ}$ — приведенный к ротору АД статический момент нагрузки, $M_Н$ — номинальный момент АД.

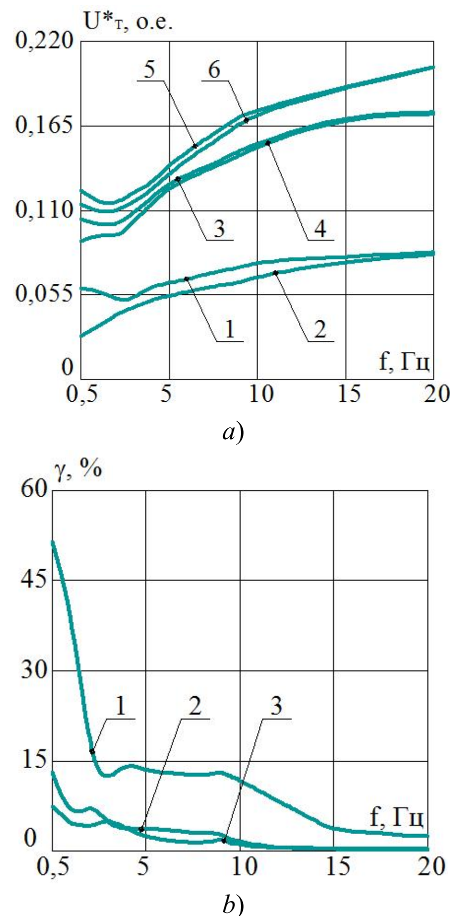


Рис. 6. Зависимости значений $U^*_т$ при изменении коэффициентов m-подмодуляции формируемого UАИН и частоты f тока статора АД

Fig. 6. Value dependences of U^*_m *under coefficients variation of m-submodulation of generated UАИН and stator current frequency f*

Следует отметить значительное уменьшение относительного напряжения $U^*_т$ при снижении частоты менее 10 Гц, что свидетельствует об уменьшении Kэф трения в звеньях подвижности ПМ ЧУЭП.

На рис. 6, *б* приведены зависимости 1 при $M_{СТ} = 0{,}1M_Н$; 2 при $M_{СТ} = 0{,}3M_Н$; 3 при $M_{СТ} = 0{,}5M_Н$ относительного изменения приращений γ амплитуд напряжений трогания АД с подмодуляцией и без нее. Они определяются для частот от 0,5 до 20 Гц с интервалом 5 Гц из соотношения

$$\gamma = \{(U^*_{тс} - U^*_{тm})/U^*_{тс}\} \cdot 100\ \%,$$

где $U^*_{тс}$ — относительное синусоидальное напряжение трогания АД ($m = 4$); $U^*_{тm}$ — относительное напряжение трогания АД ($m = 1$).

Пусковой ток и, соответственно, момент $M_{тп}$ определялись по изменению значения $U^*_т = 0 \ldots 1$ (за счет регулирования выходного напряжения блока БП1 с номинальным напряжением $U_{БП1} = 100$ В) и выбранной интервальной установкой частоты тока АИН в диапазоне 0,5–20 Гц. При повышении частоты тока статора f влияние рассматриваемого коэффициента Kэф уменьшается, движение звеньев ИМ осуществляется уже в области линейного (вязкого) трения.

Экспериментально полученные значения скоростей и ускорений движения контрольных точек РО (с подключением датчиков: энкодеров и акселерометров) при двухрежимном управлении АИН и регулировании вибрации ротора АД подтвердили уменьшение негативного влияния сил трения в звеньях ПМ на динамику движения РО [22].

В результате анализа данных, полученных при исследовании на стенде, установлены следующие факты:

— расширен диапазон регулирования скорости привода (от 80 до 120);

— повышена равномерность вращения вала АД в 1,2–1,5 раза в зоне малой скорости движения РО, т. е. при частотах тока статора 0,5–20 Гц.

При этом обеспечивается формирование целесообразных механических характеристик АД [23, 24] и приемлемая реализация потребления электроэнергии (по минимуму потерь) в пускотормозных режимах работы ЧУЭП.

Выводы. Выполненные в статье теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Неоднозначность коэффициентов трения в звеньях ПМ удобно оценивать по уровню напряжения трогания АД, значение которого является исходным для программного выбора способа управления двухрежимным АИН по формированию выходного напряжения.

2. Снижение эффективного коэффициента $K_{эф}$ трения в звеньях подвижности ПМ (в зоне малой и ползучей скорости движения РО) обусловлено эффектом вибрационной линеаризации сил трения в направляющих ИМ под действием пульсирующих моментов на валу АД.

3. Пульсирующие моменты на валу АД ЧУЭП, формируемые 5-й, 7-й и основной гармониками тока статора АД и создающие колебательные (вращающие и тормозящие) моменты, способствуют снижению напряжения трогания $U_т$ статора АД от 7 % до 50 % в пускотормозных режимах работы АД при изменении частоты тока статора в диапазоне 0,5–20 Гц.

4. Введение программного управления коэффициентом m-подмодуляции в пределах ($2 \le m \le 4$) формируемого напряжения АИН (при $K_u \le 5$–8 %) способствует повышению равномерности движения и точности позиционирования РО при торможении АД ЧУЭП.

Библиографический список

1. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. — Москва : Academia, 2004. — 241 с.

2. Карнаухов, Н. Ф. Улучшение характеристик частотного электропривода технологических машин в зоне малой скорости движения исполнительного механизма / Н. Ф. Карнаухов, Ю. В. Пудова, М. Н. Филимонов // Молодежь. Техника. Космос : тр. IV Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. — Вестник БГТУ. — 2012. — № 15. — С. 331–333. — (Библиотека журнала «Военмех»).

3. Карнаухов, Н. Ф. Частотно-управляемый асинхронный электропривод мехатронных систем / Н. Ф. Карнаухов. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2009. — 224 с.

4. Зельченко, В. Я. Расчет и проектирование автоматических систем с нелинейными динамическими звеньями / В. Я. Зельченко, С. Н. Шаров. — Ленинград : Машиностроение, 1986. — 174 с.

5. Перельмутер, В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В. М. Перельмутер. — Харьков : Основа, 2004. — 210 с.

6. Карнаухов, Н. Ф. Особенности формирования циклических режимов частотного электропривода технологических машин в зоне малой скорости движения исполнительного механизма / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, А. И. Изюмов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 6 (67). — С. 76–86.

7. ГОСТ32144-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Москва : Стандартинформ, 2014. — 16 с.

8. Следящие приводы. В 3 т. Т. I. Теория и проектирование следящих приводов / под ред. Б. К. Чемоданова. — 2-е изд., доп. и перераб. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. — 904 с.

9. Карнаухов, Н. Ф. Моделирование колебаний звена технологической машины в режиме динамического торможения асинхронного двигателя при частотном управлении / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Ю. В. Пудова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 4 (47). — С. 569–574.

10. Розанов, Ю. К. Электронные устройства электромеханических систем / Ю. К. Розанов, Е. М. Соколова. — Москва : Академия, 2004. — 272 с.

11. Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. — Москва : Высшая школа, 1980. — 408 с.

12. Вибрации в технике. Справочник в 6 томах / под ред. К. В. Фролова. Москва : Машиностроение, 1981 — 453 с.

13. Федоренко, И. Я. Технологии и средства механизации сельского хозяйства / И. Я. Федоренко, У. К. Сабиев // Вестник Алтайского гос. аграр. ун-та. — 2011. — № 6 (80). — С. 82–85.

14. Филонов, И. П. Теория механизмов, машин и манипуляторов / И. П. Филонов, П. П. Анципорович, В. К. Акулич. — Минск : Дизайн ПРО, 1998. — 656 с.

15. Abdo, J. The Effect of Frequency and Amplitude of Vibration on the Coefficient of Friction for Metals / J. Abdo, M. Tahat // Tribology International. — 2008. — Vol. 41, is. 4. — P. 307–314.

16. Altpeter, F. Friction modeling, identification and compensation / F. Altpeter. — Lausanne :EPFL, 1999. — 150 p.

17. Пановко, Я. Г. Лекции по основам теории вибрационных машин и технологий / Я. Г. Пановко. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. —192 с.

18. Зотеев, В. Е. Параметрическая идентификация диссипативных механических систем на основе разностных уравнений / под ред. В. П. Радченко. — Москва : Машиностроение, 2009. — 344 с.

19. Электромеханические системы управления тяжелыми металлорежущими станками / С. В. Демидов [и др.] ; под общ. Ред. С. В. Демидова. — Ленинград : Машиностроение, 1986. — 236 с.

20. Моделирование режима торможения асинхронного двигателя частотного электропривода с использованием гармоник тока статора / Н. Ф. Карнаухов [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 1 (84). — С. 87–98.

21. Филимонов, М. Н. Улучшение динамики торможения асинхронного двигателя станочной системы с частотным управлением / М. Н. Филимонов, Н. Ф. Карнаухов // Современные проблемы машиностроения и высоких технологий : мат-лы междунар. науч.-техн. конф. В 3 т. — Ростов-на-Дону : Изд-во Дон. гос. техн. ун-та. — 2005. — Т. 1 — С. 236–242.

22. Карнаухов, Н. Ф. Особенности формирования двухтокового динамического торможения асинхронного двигателя мехатронной системы при частотном управлении / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Н. В. Деркачев // Мехатроника-2008 : мат-лы IV Междунар. науч.-практ. студ. коллоквиума. — Новочеркасск, 2008. — С. 17–20.

23. Карнаухов, Н. Ф. Энергетические показатели электропривода при частотном способе управления асинхронным двигателем / Н. Ф. Карнаухов, В. А. Прус, М. Н. Филимонов // Труды VIII Междунар. науч.-техн. конф. по динамике технологических систем. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2007. — Т. III. — С. 24–30.

24. Установка для демонстрации рекламно-информационного материала и устройство управления перемещением носителя : патент № 36914 Рос. Федерация : МПК^7 G 09 F 13/00 H 02 P 7/36 / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, С. А. Ушаков. — Опубл. 27.03.04, Бюл. № 9. — 14 с.

References

1. Braslavskiy, I.Y., Ishmatov, Z.Sh., Polyakov, V.N. Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod. [Power-efficient asynchronous drive.] Moscow: Academia, 2004, 241 c.(in Russian).

2. Karnaukhov, N.F., Pudova, Y.V., Filimonov, M.N. Uluchshenie kharakteristik chastotnogo elektroprivoda tekhnologicheskikh mashin v zone maloy skorosti dvizheniya ispolnitel'nogo mekhanizma. [Performance improvement of frequency drive of production machines in actuator low speed zone.] Molodezh'. Tekhnika. Kosmos: tr. IV Obshcherossiyskoy molodezhnoy nauch.-tekhn. konf. [Youth. Engineering. Space: Proc. IV All-Russian Youth Sci.-Tech. Conf.] Bulletin of BSTU, 2012, no. 15, pp. 331–333 (in Russian).

3. Karnaukhov, N.F. Chastotno-upravlyaemyy asinkhronnyy elektroprivod mekhatronnykh system. [Frequency-controlled asynchronous electric drive of mechatronic systems.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2009, 224 p. (in Russian).

4. Zelchenko, V.Y., Sharov, S.N. Raschet i proektirovanie avtomaticheskikh sistem s nelineynymi dinamicheskimi zven'yami. [Calculation and design of automatic systems with nonlinear dynamic links.] Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 174 p. (in Russian).

5. Perelmuter, V.M. Pryamoe upravlenie momentom i tokom dvigateley peremennogo toka. [Direct torque and current control of AC motors.] Kharkov: Osnova, 2004, 210 p. (in Russian).

6. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Izyumov, A.I. Osobennosti formirovaniya tsiklicheskikh rezhimov chastotnogo elektroprivoda tekhnologicheskikh mashin v zone maloy skorosti dvizheniya ispolnitel'nogo mekhanizma. [Generation features of cycle operations for production machine variable-frequency drive in low-velocity zone of actuator.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 6 (67), pp. 76–86 (in Russian).

7. GOST32144-2014. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. [GOST 32144-2014. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Control and monitoring of electric power quality in the public power supply systems.] CIS Council for Standardization, Metrology and Certification. Moscow: Standartinform, 2014, 16 p. (in Russian).

8.Chemodanov, B.K., ed. Sledyashchie privody. V 3 t. T. I. Teoriya i proektirovanie sledyashchikh privod-ov. [Tracking drives. In 3 vol. Vol. I. Theory and design of servo drills.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Bauman University Publ. House, 1999, 904 p. (in Russian).

9. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Pudova, Y.V. Modelirovanie kolebaniy zvena tekhnologicheskoy mashiny v rezhime dinamicheskogo tormozheniya asinkhronnogo dvigatelya pri chastotnom upravlenii. [Vibration simulation of technological machine body in the dynamic braking mode of asynchronousmachine with frequency control.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 4 (47), pp. 569–574 (in Russian).

10. Rozanov, Y.K., Sokolova, E.M. Elektronnye ustroystva elektromekhanicheskikh sistem. [Electronic devices of electromechanical systems.] Moscow: Akademiya, 2004, 272 p. (in Russian).

11. Biderman, V.L. Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy. [Theory of mechanical oscillations.] Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 408 p. (in Russian).

12. Frolov, K.V., ed. Vibratsii v tekhnike. Spravochnik v 6 tomakh. [Vibrations in technical facilities. Reference book in 6 volumes.] Moscow: Mashinostroenie, 1981, 453 p. (in Russian).

13. Fedorenko, I.Ya., Sabiev, U.K. Tekhnologii i sredstva mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva. [Technologies and means of agriculture mechanization.] Bulletin of Altai State Agricultural University, 2011, no. 6 (80), pp. 82–85 (in Russian).

14. Filonov, I.P., Antsiporovich, P.P., Akulich, V.K. Teoriya mekhanizmov, mashin i manipulyatorov. [Theory of mechanisms, machines and manipulators.] Minsk: Dizayn PRO, 1998, 656 p. (in Russian).

15. Abdo, J., Tahat, M. The Effect of Frequency and Amplitude of Vibration on the Coefficient of Friction for Metals. Tribology International, 2008, vol. 41, iss. 4, pp. 307–314.

16. Altpeter, F. Friction modeling, identification and compensation. Lausanne: EPFL, 1999, 150 p.

17. Panovko, Y.G. Lektsii po osnovam teorii vibratsionnykh mashin i tekhnologiy. [Lectures on the theory basics of vibrating machines and technologies.] Moscow: Bauman University Publ. House, 2008,192 p. (in Russian).

18. Zoteev, V.E.; Radchenko, V.P., ed. Parametricheskaya identifikatsiya dissipativnykh mekhanicheskikh sistem na osnove raznostnykh uravneniy. [Parametric identification of dissipative mechanical systems based on difference equations.] Moscow: Mashinostroenie, 2009, 344 p. (in Russian).

19. Demidov, S.V., et al. Elektromekhanicheskie sistemy upravleniya tyazhelymi metallorezhushchimi stankami. [Electromechanical control systems for heavy metal cutting machines.] Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 236 p. (in Russian).

20. Karnaukhov, N.F. Modelirovanie rezhima tormozheniya asinkhronnogo dvigatelya chastotnogo elektroprivoda s ispol'zovaniem garmonik toka statora. [Braking mode simulation of induction motor of variable-frequency drive using stator current harmonics.] Vestnik of DSTU, 2016, vol. 16, no. 1 (84), pp. 87–98 (in Russian).

21. Filimonov, M.N., Karnaukhov, N.F. Uluchshenie dinamiki tormozheniya asinkhronnogo dvigatelya stanochnoy sistemy s chastotnym upravleniem. [Improvement of braking dynamics of induction motor of machine system with frequency control.] Sovremennye problemy mashinostroeniya i vysokikh tekhnologiy : mat-ly mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. V 3 t. [Modern problems of machine building and high technologies: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. In 3 vol.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2005, vol. 1, pp. 236–242 (in Russian).

22. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Derkachev, N.V. Osobennosti formirovaniya dvukhtokovogo dinamicheskogo tormozheniya asinkhronnogo dvigatelya mekhatronnoy sistemy pri chastotnom upravlenii. [Features of formation of two-current dynamic braking of induction motor of mechatronic system under frequency control.] Mekhatronika-2008: mat-ly IV Mezhdunar. nauch.-prakt. stud. kollokviuma. [Mechatronics-2008: Proc. 4th Int. Sci.-Pract. Stud. Colloquium.] Novocherkassk, 2008, pp. 17–20 (in Russian).

23. Karnaukhov, N.F., Prus, V.A., Filimonov, M.N. Energeticheskie pokazateli elektroprivoda pri chastotnom sposobe upravleniya asinkhronnym dvigatelem. [Power indicators of electric drive under frequency control method of asynchronous motor.] Trudy VIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. po dinamike tekhnologicheskikh sistem. [Proc. VIII Int. Sci.-Tech. Conf. on Technological Systems Dynamics.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2007, vol. III, pp. 24–30 (in Russian).

24. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Ushakov, S.A. Ustanovka dlya demonstratsii reklamno-informatsionnogo materiala i ustroystvo upravleniya peremeshcheniem nositelya: patent № 36914 Ros. Federatsiya : MPK7 G 09 F 13/00 H 02 P 7/36. [Installation for demonstration of promotional content and media motion-control device.] Patent RF, no. 36914, 2004 (in Russian).

Поступила в редакцию 16.05.2017
Сдана в редакцию 16.05.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 16.05.2017
Submitted 16.05.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Карнаухов Николай Федорович,
профессор кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), кандидат технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3501-8182
Nika811@bk.ru

Филимонов Максим Николаевич,
заместитель декана факультета «Автоматизация, мехатроника и управление» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2807-9171
maxfil2006@yandex.ru

Мироненко Роман Сергеевич,
доцент кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8958-3753
rmironenko@donstu.ru

Authors:

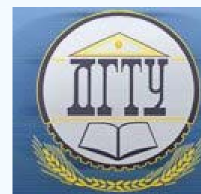
Karnaukhov, Nikolay F.,
professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3501-8182
Nika811@bk.ru

Filimonov, Maxim N.,
associate dean of the Automation, Mechatronics and Control Faculty, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2807-9171
maxfil2006@yandex.ru

Mironenko, Roman S.,
associate professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-8958-3753
rmironenko@donstu.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.14:669.15–194 10.23947/1992-5980-2017-17-3-5-89-95

Сварка трением штуцеров и патрубков малого диаметра из углеродистой стали 22К*

Ю. В. Полетаев[1], В. Ю. Полетаев[2], В. В. Щепкин[3]**

[1,3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2] ООО «АВАЛОН-ВИДЕО», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация

Friction welding of small-diameter fittings and nozzles of 22K carbon steel***

Yu. V. Poletaev[1], V. Yu. Poletaev[2], V. V. Shchepkin[3]**

[1,3] Don State Technical University, Rostov–on–Don, Russian Federation

[2]AVALON-VIDEO” JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

Введение. Проведены экспериментальные исследования и разработаны технологические рекомендации по сварке трением (СТ) штуцеров и патрубков малого (до 80 мм) диаметра сварных конструкций теплового и атомного машиностроения. Исследована возможность применения сварки трением штуцеров и патрубков малого диаметра корпусного оборудования энергетических установок вместо ручной дуговой сварки (РДС) покрытым электродом.

Материалы и методы. Модели штуцерных и патрубковых узлов были изготовлены из низкоуглеродистой стали марки 22К. Выбор угла подготовки конусной поверхности, отработка параметров режима СТ и сварка штуцерных моделей диаметром 40 мм выполнялась на машине МСТ–35–5. Сварка патрубковых моделей диаметром 80 мм была осуществлена на машине МСТ–41, в условиях ОАО «ЭМК — АТОММАШ». Для выбора угла конусной поверхности и отработки параметров режима сварки была разработана конструкция модели штуцерного узла с разными углами конусной поверхности. Размеры углов сопрягаемых поверхностей стыка были выбраны с учетом энергетических возможностей сварочной машины МСТ–35–5 и ожидаемых размеров формируемой зоны сплавления, определяющих качество металла сварного соединения.

Результаты исследования. Разработано конструктивное оформление моделей и соединяемых (конусных) поверхностей штуцерных и патрубковых узлов; обоснован выбор оптимальных углов подготовки поверхностей под сварку; обоснован выбор значений параметров режима сварки и осуществлена их экспериментальная проверка; выполнена оценка качества сварных соединений неразрушающими и разрушающими методами. Установлено влияние конструктивного и технологического факторов на качество сварных соединений.

Обсуждение и заключения. Полученные положительные результаты экспериментального исследования подтвердили технологическую возможность и экономическую целесообразность сварки трением штуцеров и патрубков малого диаметра вместо ручной дуговой сварки покрытыми электродами. Исследование возможности применения сварки трением для приварки штуце-

Introduction. The pilot study method and development of technological recommendations on friction welding (FW) of fittings and nozzles of small (up to 80 mm) diameter for welded constructions of the thermal and atomic engineering are described. The feasibility of applying the method of FW of small-diameter fittings and nozzles for the powerplant package units instead of manual arc welding (MAW) is studied.

Materials and Methods. Models of fittings and nozzle units are made of low-carbon *22K* steel. The selection of the angle of the conical surface preparation, the optimization of FW mode parameters, and welding of the fitting models of 40 mm in diameter are carried out on the MST-35-5 machine. Welding of nozzle models of 80 mm in diameter is implemented on the MST-41machine under the conditions of “EMK-ATOMMASH” JSC. A model structure of the nozzle unit with different angles of the conical surface is developed to select the angle of the conical surface and to optimize welding mode parameters. The dimensions of the mating interfaces angles are chosen allowing for the performance of the MST-35-5 welding machine, and for the anticipated dimensions of the fusion zone under formation which determine the weld metal quality.

Research Results. The design of models and connected (conical) surfaces of fitting and nozzle units is developed. The choice of optimum angles of surfaces of preparation for welding is explained. The selection of welding parameters values is proved, and their experimental verification is carried out. Welded joints quality is tested through the nondestructive and destructive methods. The effect of the constructive and technological factors on the quality of welded joints is determined.

Discussion and Conclusions. The obtained successful outcome of the pilot study has confirmed the technological capability and economic feasibility of the application of friction welding for small-diameter fittings and nozzles instead of manual arc welding with coated electrodes. Investigation of feasibility of applying FW for welding fittings and nozzles should be continued in the following directions: development of equipment; certification of

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: anclav51@mail.ru, afshor@mail.ru, shepkinviktor@rambler.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

ров и патрубков следует продолжить в направлении разработки оборудования, аттестации способа сварки, разработки и аттестации технологии сварки трением.

the welding method; development and testing of the friction welding technology.

Ключевые слова: Сварка трением, конструкция разделки, модель патрубкового узла, низкоуглеродистая сталь, параметры режима сварки, твердость сварного соединения, макроструктура, микроструктура, качество
сварного соединения.

Keywords: friction welding, preparation design, nozzle unit model, low-carbon steel, welding parameters, joint weld hardness, macrostructure, microstructure, joint weld quality.

Образец для цитирования: Полетаев, Ю. В. Сварка трением штуцеров и патрубков малого диаметра из углеродистой стали 22К / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев, В. В. Щепкин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 89–95.

For citation: Yu.V. Poletaev, V.Yu. Poletaev, V.V. Shchepkin. Friction welding of small-diameter fittings and nozzles of 22K carbon steel. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 89–95.

Введение. Для приварки штуцеров и патрубков малого диаметра корпусного оборудования ТЭС и АЭС в основном применяется ручная электродуговая сварка (РДС) покрытым электродом. Применение механизированных способов сдерживается недостаточной изученностью процесса формирования качественных сварных швов малой протяженности. Следует отметить, что недостатки РДС не позволяют обеспечить требуемое стабильное качество сварных соединений оборудования ТЭС и АЭС, что приводит к повторным дорогостоящим ремонтам и повышению технологической себестоимости сварных конструкций. Решение указанной проблемы возможно на основе исследования, разработки и внедрения технологии автоматизированных способов сварки, например, сварки трением [1, 2].

Степень разработанности темы исследования. Теоретические основы сварки трением (СТ) изложены в работах [3–5]. СТ происходит в твердом состоянии при воздействии теплоты, возникающей при трении поверхностей свариваемого изделия. Работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, превращается в теплоту, которая нагревает стык до температуры 950–1300 °С. Процесс образования сварного соединения завершают проковкой: к нагретым, но уже неподвижным деталям на некоторое время прикладывают сжимающее усилие. После проковки происходит естественное охлаждение сварного соединения. Одно из наиболее важных достоинств способа СТ — высокое качество получаемых сварных соединений [6, 7]. При правильно выбранном режиме сварки металл стыка и прилегающих к нему зон обладает прочностью, близкой к прочности основного металла. Основные параметры процесса сварки трением сравнительно легко программируются. Оборудование для сварки трением — это полуавтоматы с минимальным использованием ручного труда, либо автоматы, работа которых протекает без участия человека. Применение СТ ограничено формой и размерами сечения свариваемых деталей. Диапазон площадей сечений деталей, которые целесообразно сваривать трением, составляет 30–8000 мм^2. В настоящее время способ сварки трением штуцеров и патрубков малого диаметра не получил промышленного применения, что подтверждается отсутствием информации в литературе [8–10]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование возможности применения способа сварки трением для приварки штуцеров и патрубков малого диаметра из стали 22К.

Методы проведения исследований и их результаты. Качество сварного соединения, выполненного СТ, зависит от завершенности следующих процессов, протекающих на контактных поверхностях: удаление загрязнений; изнашивание и разрушение оксидных пленок и приповерхностных слоев заготовок; пластическое течение металла; упрочнение и разупрочнение поверхностных слоев; быстрый нагрев и охлаждение, вызывающие структурно-фазовые превращения; массоперенос металла с одной заготовки на другую и образование между контактными поверхностями твердых «клиньев», сформированных из срезанных микронеровностей и имеющих тенденцию к росту за счет переноса металла.

Для реализации поставленных целей были решены следующие задачи:

- разработка конструкции моделей штуцерных и патрубковых узлов; определение оптимальных геометрических размеров сопрягаемых конусных поверхностей с учетом возможностей сварочного оборудования;
- определение оптимальных углов подготовки контактирующих поверхностей деталей на основании результатов опытных сварок;
- экспериментальное обоснование выбора параметров режима сварки;
- оценка качества сварных соединений с использованием методов неразрушающего и разрушающего контроля, применяемых при изготовлении сварных конструкций АЭС.

Модели штуцерных и патрубковых узлов были изготовлены из низкоуглеродистой стали марки 22К со следующим химическим составом: углерод — 0,19; кремний — 0,20; марганец — 0,75; хром — до 0,40; никель — до 0,30; медь — до 0,30; сера — 0,045; фосфор — 0,045 весовых процентов. Механические свойства стали: временное сопротивление разрыву $\sigma_в$ = 431 МПа; условный предел текучести σ_{02} = 216 МПа; относительное удлинение δ = 21%; относительное сужение ψ = 45%; ударная вязкость KCV = 68,6 Дж/м^2.

Выбор угла подготовки конусной поверхности, отработка параметров режима СТ и сварка штуцерных моделей диаметром 40 мм выполнялась на машине МСТ–35–5. Сварку патрубковых моделей диаметром 80 мм осуществ-

ляли на машине МСТ–41, в условиях ОАО «ЭМК — АТОММАШ». Для зажатия имитатора корпуса моделей патрубковых узлов был разработан и изготовлен специальный корпус к машине МСТ–41.

Для выбора угла конусной поверхности и отработки параметров режима сварки была разработана конструкция модели штуцерного узла с разными углами конусной поверхности. Размеры углов сопрягаемых поверхностей стыка были выбраны с учетом энергетических возможностей сварочной машины МСТ–35–5 и ожидаемых размеров формируемой зоны сплавления, определяющих качество металла сварного соединения. Элементы модели штуцерного узла продемонстрированы на рис. 1.

На начальном этапе исследования выполнялась сварка модели штуцерного узла, имитатор корпуса которого имел цилиндрическую форму. При этом имитатор штуцера был изготовлен с конусным участком. При такой форме подготовки контактирующих поверхностей получить сварное соединение не удалось. В первоначальный момент процесса сварки произошел отрыв нижней части конуса имитатора штуцера по линии контакта с имитатором корпуса.

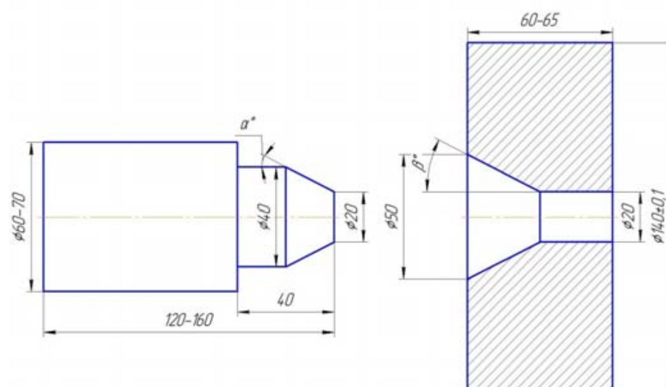
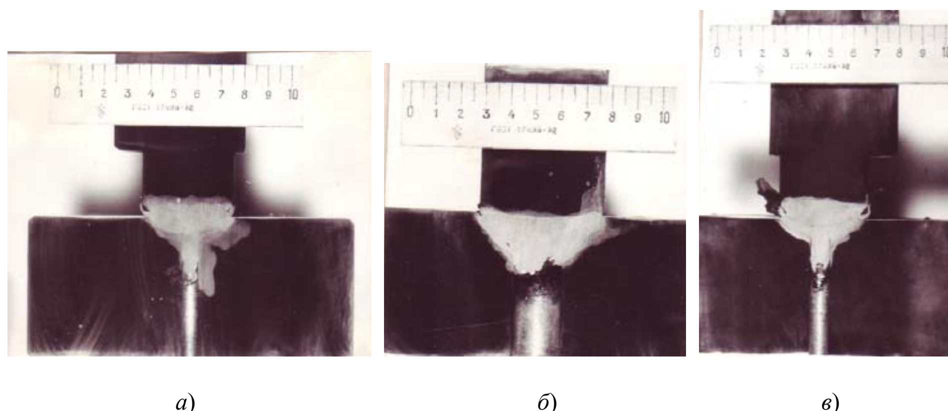


Рис. 1. Эскиз имитатора штуцера и корпуса модели штуцерного узла

Fig. 1. Sketch of simulator of fitting and nozzle unit model body

При подготовке поверхностей элементов моделей для сварки с углами: α = 30,0°; 32,5°; 35,0°; 37,5° и 40° сварные соединения были качественно сформированы при обоснованно выбранных параметрах режима СТ. Из перечисленного ряда изготовленных сварных моделей наиболее качественные (без видимых технологических дефектов типа «несплавление») сварные соединения (рис. 2, *а*) получены при подготовке конусной поверхности с углом α = 37,5° при следующих параметрах режима сварки: время редуцирования $t_{\text{ред}}$ = 6–10 сек.; давление нагрева $P_{н}$ = 323 кПа; давление проковки $P_{\text{пр}}$ = 539 кПа; время сварки t_c = 27–32 сек; диаметр штуцера — 40 мм. На рис. 2, *б* изображено сварное соединение, в котором образующая конусного участка имитатора штуцера выходит на 10 мм за малый диаметр конусной поверхности имитатора корпуса. На рис. 2, *в* проиллюстрирован тип сварного соединения, у которого разница в углах конусных поверхностей составляет не более 1,5°. При выборе угла конусной поверхности и параметров режима сварки качество сварных соединений дополнительно оценивалось по результатам анализа макро- и микроструктуры. На основе анализа было сделано заключение о стимулирующем влиянии исследуемых факторов на качество сварного стыка.



а) *б*) *в*)

Рис. 2. Сварные соединения моделей штуцерного узла с диаметром штуцера 40 мм

Fig. 2. Weld joints of models of nozzle unit models withnozzle of 40 mm in diameter

Выполненные сварные соединения подвергали рентгенографическому контролю, ультразвуковому контролю и испытанию на растяжение, с оценкой качества как для швов первой категории [11]. Результаты экспериментов по выбору углов конусных контактирующих поверхностей и параметров режима СТ, полученные на штуцерных моделях, были учтены при разработке модели и технологии сварки патрубковых узлов (рис. 3).

Обсуждение результатов исследований. Анализ экспериментальных результатов исследований сварки штуцерных узлов показал, что формирование качественного сварного соединения зависит от влияния элементов конструктивного оформления собираемых деталей, в частности:

- от расстояния между малым диаметром конуса имитатора корпуса и малого диаметра конуса имитатора штуцера;
- от длины конусного участка имитатора штуцера, выходящего за малый диаметр конусной поверхности имитатора корпуса;
- от величины разности углов конусной поверхности имитатора штуцера и имитатора корпуса.

Указанные факторы, влияющие на деформирование сварного соединения, необходимо учитывать совместно с параметрами режима сварки $t_{\text{ред}}$ и $P_{\text{н}}$.

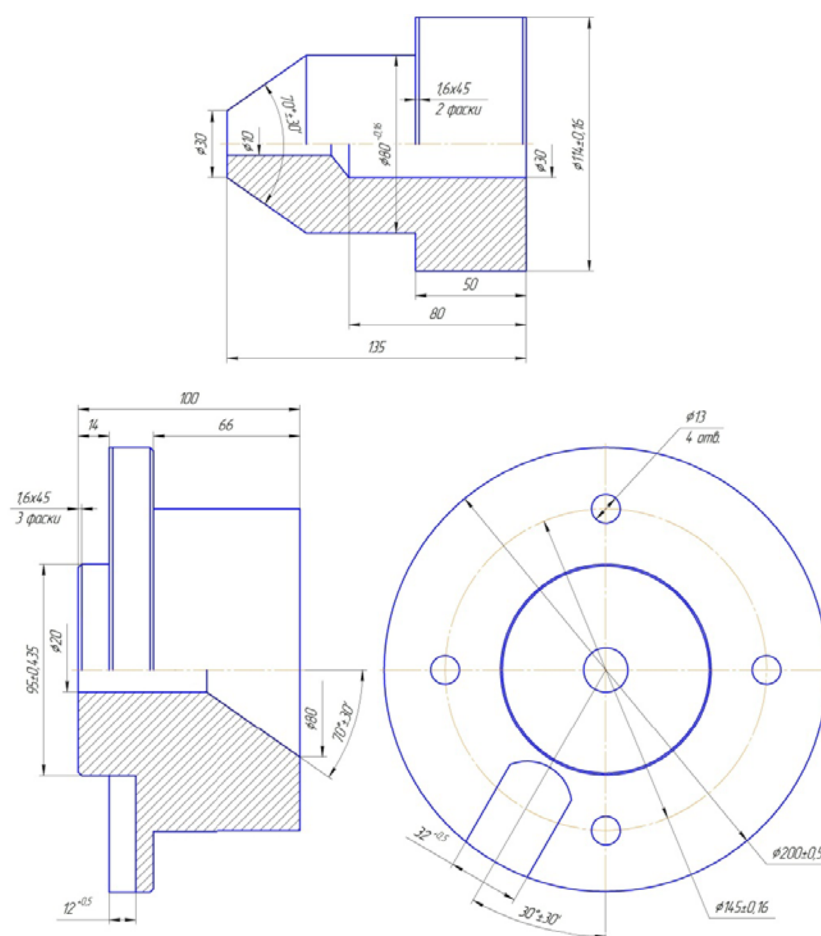


Рис. 3. Эскиз имитаторов патрубка и корпуса патрубкового узла

Fig. 3. Sketch of simulators of nozzle and nozzle unit body

Изменяя величину вышеуказанных параметров, можно сформировать качественное сварное соединение при прочих оптимальных параметрах режима сварки. Сварка моделей патрубкового узла с диаметром патрубка 80 мм выполнялась на машине МСТ–41 со следующими параметрами режима: $t_{\text{с}}$ = 40–50 сек; $t_{\text{ред}}$ = 10–12 сек.; $P_{\text{н}}$ = 630–700 МПа; $P_{\text{пр}}$ = 105–120 МПа. Сварные модели без удаления грата, образовавшегося в процессе сварки, продемонстрированы на рис. 4. Из моделей патрубкового узла, в исходном после сварки состоянии, были изготовлены образцы для механических испытаний на растяжение, ударную вязкость и угол загиба. Механические свойства металла сварного соединения: предел прочности $\sigma_{\text{в}}$ = 441–559 МПа; предел текучести σ_{02} = 314–402 МПа; относительное удлинение δ =

14,5–15,5%; относительное сужение ψ = 70,0–78,0 %; угол загиба α = 123 градуса; ударная вязкость *KCV* = 127,5–251,0 Дж/м.



Рис. 4. Сварная модель из стали 22К с диаметром патрубка 80 мм

Fig. 4. Welded model from 22K steel with nozzle of 80 mm in diameter

Механические свойства металла сварного соединения по сравнению с основным металлом оказались более высокими. Анализ результатов механических испытаний и металлографических исследований показал, что для улучшения структуры и механических свойств сварного соединения стали 22К необходимо проведение термической обработки.

Фотография макро- и микроструктуры сварного соединения, вырезанного из модели патрубкового узла стали 22К, представлена на рис. 5. Максимальная ширина сварного шва составляет 20–25 мм и соответствует протяженности зоны максимального термодеформационного воздействия. Макроструктура сварного шва представляет собой чередующиеся зоны различной дисперсности и травимости, подвергнутые различному термодеформационному воздействию.

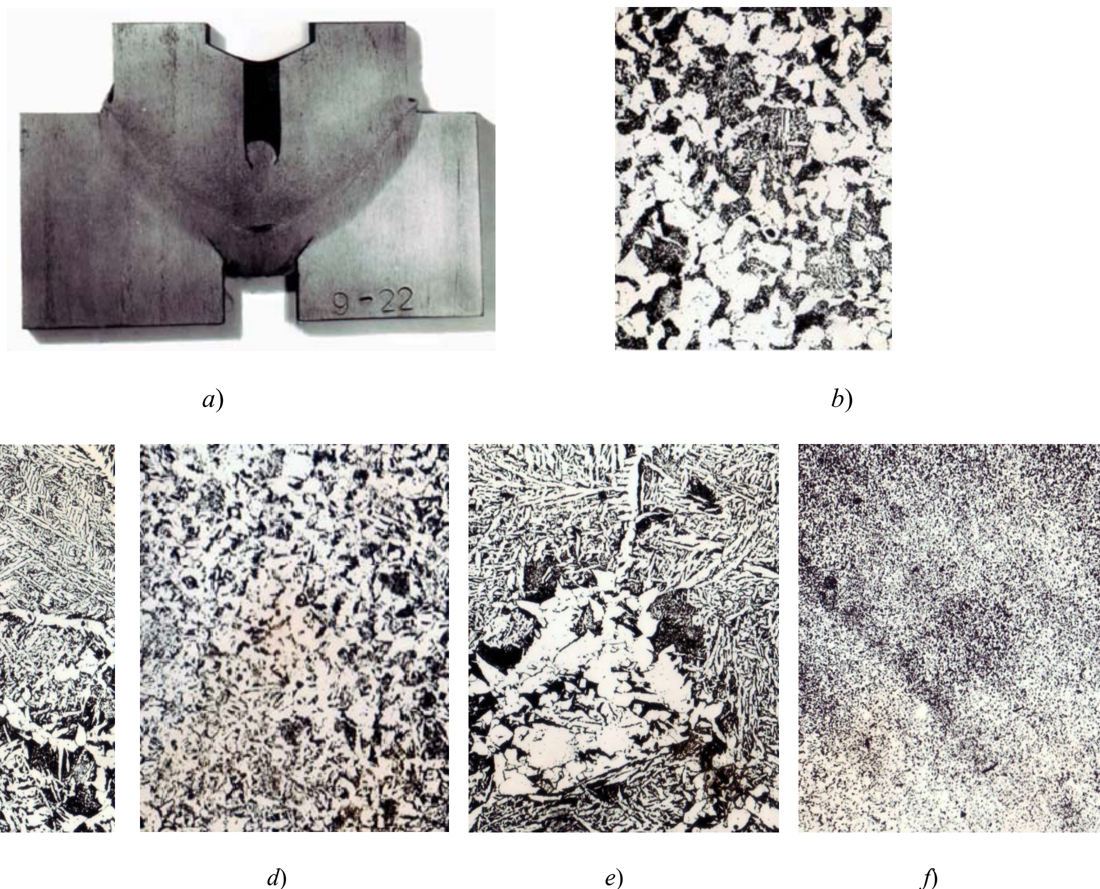


Рис. 5. Макро- (*a*) и микроструктура различных зон сварного соединения из стали 22К, выполненного сваркой трением: *b* — основной металл; *c, d* — зона термического влияния; *e, f* — зона сплавления

Fig. 5. Macro- (a) and microstructure of different weld junctionsof 22K steel implemented through friction welding: b — base metal;c, d — heat-affected zone; e, f — fusion zone

На рис. 5 отчетливо выявляется зона сплавления. В макроструктуре технологических сварочных дефектов не выявлено, за исключением узкого кольцевого непровара в наружной части соединения, который удаляется при механической обработке грата.

Распределение твердости по сечению сварного соединения достаточно однородно. Твердость растет от основного металла (*HV* 145–155) и достигает максимума у линии сплавления (*HV* 200–230). Основной металл имеет феррито-перлитную структуру (рис. 5, *б*). Зона термического влияния имеет ярко выраженную направленность волокна (рис. 5, *в*, *г*), в которой структура изменяется от мелкодисперсного и полиэдрического (рис. 5, *в*) и мелко-игольчатого феррита к видманштетовому ферриту с ферритной оторочкой по границам аустенитного зерна, являющейся характерной структурой перегретого металла.

Выводы. Положительные результаты неразрушающего и разрушающего контроля качества сварных соединений штуцерных и патрубковых моделей обосновывают возможность применения сварки трением штуцеров и патрубков малого диаметра (до диаметра 80 мм включительно) из стали 22К. При этом сварные соединения рекомендуется подвергать термической обработке (отпуску). Установлено, что при сварке трением по конусной поверхности происходит измельчение структуры металла на значительную глубину свариваемых элементов, что определяет высокие механические свойства металла сварного соединения. Сварные соединения наиболее высокого качества формируются при сварке трением по конусной поверхности с углом 70 °. Авторы считают перспективным продолжить работу в следующих направлениях: разработка оборудования; аттестация способа сварки; разработка и аттестация технологии сварки трением.

Библиографический список

1. Воинов, В. П. Технология и оборудование сварки трением / В. П. Воинов, Р. Н. Болдырев. — Москва : Машиностроение,1985. — 61 с.

2. Вилль, В. И. Сварка металлов трением / В. И. Вилль. — Ленинград : Машиностроение, 1970. — 175 с.

3. Duffin E. L., Bahrani A. S. The mechanics of friction welding mild steel // Metal Construction. 1976. — V.8. No.6. — P.267-271.

4. Kuruzar D. I. Joint design for the friction welding process // Welding Journal. 1979. — V.58. No. 6. — P. 31-35.

5. Sayegh J. Carec R. Posibilites et perspectives du soudage par friction Applications – Evolution de la technique et perspectives // Soudage et techniques connexec. 1981. — V.35. No.5. — P.152-160.

6. Bethlehem W.F. Uberwachen des Reibschweissens mit dem Ziel des Gutesicherung //Diahtwelt.1983. — V.69.No.7. — P.173-176.

7. Basile G., Benchetto A., Triouleyre J. Soudage par friction Recherche d-une correlation entre les parameters du procede et la gwalite du joint // Soudage et techniques connexes. 1984. — V.38. No. 9-10. — P.338-349.

8. Каракозов, Э. С. Современное состояние сварки трением (обзор). Часть 1 / Э. С. Каракозов, Р. И. Мустафаев, Н. В. Мельникова // Сварочное производство. — 1989. — № 8. — С. 2–5.

9. Каракозов, Э. С. Современное состояние сварки трением (обзор). Часть 2 / Э. С. Каракозов, Р. И. Мустафаев, Н. В. Мельникова // Сварочное производство. — 1989. — № 9. — С.1–4.

10. Щепкин, В. В. Перспективы применения сварки трением в машиностроении [Электронный ресурс] / В. В. Щепкин, Ю. В. Полетаев // Блокнот молодого ученого. Портал электронного обучения «Скиф». — Режим доступа : http: // moodle.dstu.edu.ru/course/view.php?id=4549 (дата обращения : 16.07.17).

11. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки : правила контроля ПН АЭГ–7–010–89. — Москва : ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1989. — 125 с.

References

1. Voinov, V.P., Boldyrev, R.N. Tekhnologiya i oborudovanie svarki treniem. [Friction welding technology and equipment.] Moscow: Mashinostroenie, 1985, 61 p. (in Russian).

2. Will, V.I. Svarka metallov treniem. [Friction welding of metals.] Leningrad: Mashinostroenie, 1970, 175 p. (in Russian).

3. Duffin, E. L., Bahrani, A. S. The mechanics of friction welding mild steel. Metal Construction, 1976, vol. 8, no. 6, pp. 267-271.

4. Kuruzar, D. I. Joint design for the friction welding process. Welding Journal, 1979, vol.58, no. 6, pp. 31-35.

5. Sayegh J., Carec R. Posibilites et perspectives du soudage par friction Applications – Evolution de la technique et perspectives. Soudage et techniques connexec, 1981, vol.35, no.5, pp. 152-160.

6. Bethlehem W.F. Uberwachen des Reibschweissens mit dem Ziel des Gutesicherung. Diahtwelt, 1983, vol. 69, no. 7, pp. 173-176.

7. Basile G., Benchetto A., Triouleyre J. Soudage par friction Recherche d-une correlation entre les parameters du procede et la gwalite du joint. Soudage et techniques connexes, 1984, vol. 38, no. 9-10, pp. 338-349.

8. Karakozov, E.S., Mustafaev, R.I., Melnikova, N.V. Sovremennoe sostoyanie svarki treniem (obzor). Chast' 1. [Current state of friction welding (review). Part 1.] Svarochnoe Proizvodstvo, 1989, no. 8, pp. 2–5 (in Russian).

9. Karakozov, E.S., Mustafaev, R.I., Melnikova, N.V. Sovremennoe sostoyanie svarki treniem (obzor). Chast'2. [Current state of friction welding (review). Part 2.] Svarochnoe Proizvodstvo, 1989, no. 9, pp. 1–4 (in Russian).

10. Shchepkin, V.V., Poletaev, Yu.V. Perspektivy primeneniya svarki treniem v mashinostroenii. [Application prospects for friction welding in mechanical engineering.] Available at: http: // moodle.dstu.edu.ru/course/view.php?id=4549 (accessed: 16.07.17) (in Russian).

11. Oborudovanie i truboprovody atomnykh energeticheskikh ustanovok. Svarnye soedineniya i naplavki: pravila kontrolya PN AEG–7–010–89. [Equipment and pipelines of nuclear power plants. Welded joints and surfacing: rules for control of PN AEG–7–010–89.] Moscow: TsNIIATOMINFORM, 1989, 125 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 09.03.2017
Сдана в редакцию 10.03.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 09.03.2017
Submitted 10.03.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Полетаев Юрий Вениаминович,
профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5465-1886
Anclav51@mail.ru

Полетаев Валерий Юрьевич,
директор ООО «АВАЛОН-ВИДЕО» (РФ, г. Волгодонск, Ростовская область),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3677-7500
afshor@mail.ru

Щепкин Виктор Викторович,
студент кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1) ,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0659-6963
shepkinviktor@rambler.ru

Authors:

Poletaev, Yury V.,
professor of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), senior research scholar,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5465-1886
Anclav51@mail.ru

Poletaev, Valery Yu.,
director, “AVALON-VIDEO” JSC (RF, Volgodonsk, Rostov region),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3677-7500
afshor@mail.ru

Shchepkin, Victor V.,
student of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0659-6963
shepkinviktor@rambler.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 628.517.625.08 10.23947/1992-5980-2017-17-3-96-102

Уточнение расчета спектров структурной составляющей шума в кабинах с большой площадью остекления*

В. А. Бондаренко[1], Т. А. Финоченко[2]**
[1,2] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Analysis specification of noise structural constituent spectra in highly glazed cabins***

V. A. Bondarenko[1], T. A. Finochenko[2]**
[1,2] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Кабины широкого класса технологических машин различного функционального назначения, в частности, путевых кранов дорожно-строительной техники, имеют большую площадь остекления. Нужно. отметить, что остекление отнести к «слабым» элементам как по звукоизоляции, так и механическому импедансу, что объясняет значительное влияние воздушной и структурной составляющих шума на формирование акустических характеристик внутри таких кабин.
Материалы и методы. Цель настоящего исследования заключалась в анализе спектров шума в кабинах, создаваемых излучением элементов остекления в замкнутом объеме, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда. Метод исследования акустических характеристик основан на фундаментальных положениях технической виброакустики для соразмерных помещений.
Результаты исследования. Поскольку кабины любых машин и оборудования представляют собой энергетически замкнутые системы, состоящие из пластин ограниченных размеров, то расчеты спектров виброакустических характеристик основаны на методах энергетического баланса. Существующие исследования вполне обоснованы для оценки уровней звукового давления, создаваемых внутри производственных помещений, когда воздействием отражённого звука можно пренебречь. При оценке уровней шума внутри кабин такое допущение является грубым и, поэтому, в данной статье приведены исследования, основанные на системе поршневых источников, излучающих звуковую энергию в замкнутый объем, а размеры самих излучателей соизмеримы с габаритными размерами кабины. Данная тема наиболее актуальна для мотовозов и кабин тепловозов.
Обсуждение и заключения. Приведенные в данной статье результаты теоретических исследований позволяют выполнить инженерные расчеты спектров вибрации и шума всех элементов ограждения кабины и оценить количественный вклад каждого в формирование спектров шума внутри кабины на рабочих местах операторов. Такие расчеты позволяют на этапе проектирования кабин оценить вклад каждого источника и определить величины превышений над предельно-

Introduction. Cabs of a wide range of technological machines of various functional purposes, in particular, track cranes of road-building equipment, have a large glass area. It will be observed that glazing should be designated as a “weak” element both in noise proofing and mechanical impedance which explains the significant effect of air and structural noise constituents on the formation of the acoustic characteristics inside such cabs.
Materials and Methods. The present study objective is to analyze noise spectra created by the emission of the cab glazing elements in the closed space in the form of a rectangular parallelepiped. The investigative technique of the acoustic characteristics is based on the fundamental principles of the engineering vibroacoustics for proportional spaces.
Research Results. Since the cabs of any machines and equipment are energetically closed systems consisting of small-scale plates, the vibroacoustic characteristics spectra analysis is based on the power balance methods. The existing studies are well founded for estimating the sound pressure levels created inside the production areas when the anacamptic sound impact can be neglected. When evaluating noise levels inside the cabins, this assumption is over-simplified, and, therefore, the studies presented in the paper are based on the system of the piston-type sources emitting sound energy into a closed space, while the dimensions of the radiators as such are commensurable to the overall sizes of the cab. This topic is most relevant for locotractors and diesel locomotive cabs.
Discussion and Conclusions. The results of the theoretical studies allow performing engineering calculations of the vibration and noise spectra of all elements of the cab enclosure, and evaluating the quantitative contribution of each one to the formation of noise spectra within the cabin in the operators' workplaces. Such analysis permits to estimate the contribution of each source at the designing stage of the cabins and to define the excess over the ad-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: bva_rek@rgups.ru, fta09@bk.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

допустимыми значениями. На этой основе также при проектировании выбираются наиболее простые, технологичные и экономически обоснованные варианты по обеспечению санитарных норм шума путем достижения требуемых параметров звукоизоляции, что сопровождается уменьшением доли воздушной составляющей шума, а также импедансов соответствующих элементов. Это, в свою очередь, приводит к снижению доли структурной составляющей шума.

missible limit values. On this basis, also in the design, the most simple, technologically and economically feasible options are chosen to ensure the sanitary norms of noise by obtaining the required soundproofing parameters which is accompanied by the decrease in the proportion of the noise air constituent, as well as the impedances of the corresponding elements. This, in turn, leads to the reduction of the part of the noise structural constituent.

Ключевые слова: шум, кабина, остекление.

Keywords: noise, cabin, glazing.

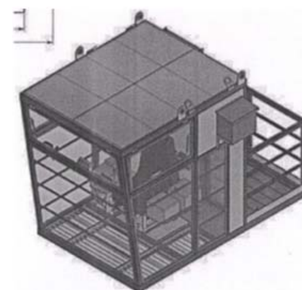
Образец для цитирования: Бондаренко, В. А. Уточнение расчета спектров структурной составляющей шума в кабинах с большой площадью остекления / В. А. Бондаренко, Т. А. Финоченко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 96–102.

For citation: V.A. Bondarenko, T.A. Finochenko. Analysis specification of noise structural constituent spectra in highly glazed cabins. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 96–102.

Введение. Излучению звукоизоляции элементов кабин технологических маши посвящено большое количество работ [1–8]. Для кабин с большой площадью остекления характерно то, что само остекление является «слабым» элементом не только по звукоизоляции, но и по распределению вибраций. В частности, экспериментальные исследования поля вибраций [7] показали, что уровни виброскорости на них существенно выше, чем на несущих элементах кабин. Поэтому можно предположить, что повышенные уровни шума в таких кабинах создаются именно элементами остекления как за счет пройденного звука, т.е. воздушной составляющей, так и за счет структурной составляющей. Поэтому воздушная составляющая шума в данной статье не рассматривается.

Основная часть. Конструкции кабин мотовозов и козловых кранов приведены на рис. 1а и б и представляют собой трехкоординатную систему.





a) b)

Рис. 1. Компоновка кабин: а — мотовоз; b — козловый кран

Fig. 1. Cab packaging: a — locotractor; b — gantry crane

При расчете звукового давления внутри кабины следует учитывать, что звуковые волны, распространяющиеся в направлении каждой из осей, происходят идентично. Разница заключается в длине пути распространения звуковых волн (согласно длине, ширине и высоте кабины). Поэтому ниже приведены результаты расчета звукового давления при распространении в направлении оси OX. Поскольку поршневые излучатели представляют собой плоские источники, то для звукового давления получена следующая формула:

$$P = 4{,}9 \cdot 10^2 V_{mn_i} arctag^{0,5} \frac{R_i l_i}{2R_i\sqrt{4R_i^2 + l_i^2 + l_i^2}}, \quad (1)$$

где V_{mn_i} — скорость колебаний источника элементов остекления, м/с.

$$\sum_1^{K_1}\left(\delta_i S_i + \alpha_{i-j} l_{i-j}\right) q_i = \sum_1^{K_1} \alpha_{j-i} l_{j-i} q_i^2 + \sum_1^{k_2} N_i\left(1 - \eta_\Sigma\right), \quad (2)$$

где δ_i — коэффициенты поглощения энергии в стенках корпуса, м$^{-1}$; $\alpha_{i-j;j-i}$ — коэффициенты передачи между двумя соседними стенками корпуса; l_{i-j} — длина линии контакта между двумя пластинами, м; q_i — потоки вибрационной мощности в стенках корпуса, Вт/м; K_1 — количество стенок корпуса; K_2 — количество подшипников в соответству-

ющей стенке; N_i — вводимая, в корпус через подшипниковые узлы, вибромощность, Вт; S_i — площадь стенки, м^2; η_Σ — коэффициент ослабления вибраций, определяемый способом установки остекления в стенке кабины.

Коэффициент затухания из [9, 10] определяется как

$$\delta_i = \frac{\pi f_{mn} \eta}{c_u}, \tag{3}$$

где f_{mn} — собственная частота колебаний элемента остекления, Гц; c_u — скорость распространения изгибной волны в элементе остекления, м/с; η — эффективный коэффициент потерь колебательной энергии.

Скорость распространения изгибной волны по данным работы [9, 10] определяется по формуле:

$$c_u = \sqrt{1{,}8\sqrt{\frac{E}{\rho}} h f_{mn}}. \tag{4}$$

где E — модуль упругости, Па; ρ — плотность, кг/м^3; μ — коэффициент Пуассона.

Потоки вибромощности в стенках корпуса определяются следующим образом:

$$q = zV^2 \tag{5}$$

для $f < f_{диф}$

$$z_1 = \frac{1}{2}\pi\eta f_{mn} M, \tag{6}$$

где M — масса стенки, кг;
для $f \geq f_{диф}$

$$z_2 = 8\frac{Eh^2}{12(1-M^2)\rho} m_0, \tag{7}$$

где m_0 — распределенная масса стенки, кг/м^2;

$$f_{диф} = \frac{16}{\pi\eta S}\sqrt{\frac{Eh^2}{12(1-M^2)\rho}}. \tag{8}$$

Тогда скорости колебаний стенок определяются следующими зависимостями:

$$V_{mn1} = \sqrt{\frac{q_i}{z_{i1}}}; \quad V_{mn2} = \sqrt{\frac{q_i}{z_{i2}}}. \tag{9}$$

С учетом физико-механических характеристик элементов остекления из стекла конструкционного получены следующие выражения.

$$c_u = 1{,}5 \cdot 10^3 \sqrt{h\left(\frac{m^2}{l_1^2} + \frac{n^2}{l_2^2}\right)}; \tag{10}$$

$$f_{mn} = 6{,}5 \cdot 10^2 h\left(\frac{m^2}{l_1^2} + \frac{n^2}{l_2^2}\right); \tag{11}$$

$$\delta_u = 1{,}4 \cdot \eta \sqrt{h\left(\frac{m^2}{l_1^2} + \frac{n^2}{l_2^2}\right)}; \tag{12}$$

$$f_{диф} = 3{,}3 \cdot 10^3 \left(\frac{h}{\eta l_1 l_2}\right). \tag{13}$$

Тогда система уравнений (2) примет вид:

$$\sum_1^k \left(1{,}4\eta\sqrt{h\left(\frac{m^2}{l_{i1}^2} + \frac{n^2}{l_{i2}^2}\right)} S_i + \alpha_{i-j} l_{i-j}\right) q_i = \sum \alpha_{i-j} l_{i-j} q_i + \sum \ldots \tag{14}$$

Из данной системы определяются скорости колебаний всех элементов остекления и подставляются в зависимость звукового давления. Коэффициент потерь колебательной энергии является частотно-зависимой величиной и для расчетов объектов исследования целесообразно использовать экспериментальные данные и полученные на основе математической обработки регрессионные зависимости [11].



Рис. 2. Коэффициент потерь колебательной энергии пластин из стекла различной толщины

Fig. 2. Loss index of oscillatory energy of the glass plates of dissimilar thickness

Экспериментальные исследования показали, что максимальное значение коэффициента потерь наблюдается для стеклянных пластин, толщина которых составляет 4–8 мм.

Результаты экспериментальных исследований частотной зависимости коэффициента потерь остекления приведены на рис. 3.

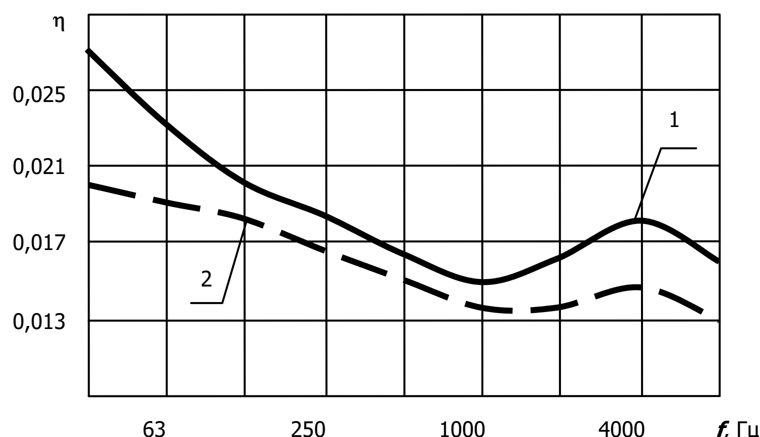


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента потерь колебательной энергии пластин из стекла различной толщины: 1 — 6 мм; 2 — 12 мм

Fig. 3. Frequency dependence of the loss index of oscillatory energy of glass plates of dissimilar thickness: 1 — 6 mm; 2 — 12 mm

Результаты экспериментальных исследований частотной зависимости коэффициента потерь двойного остекления приведены на рис. 4.

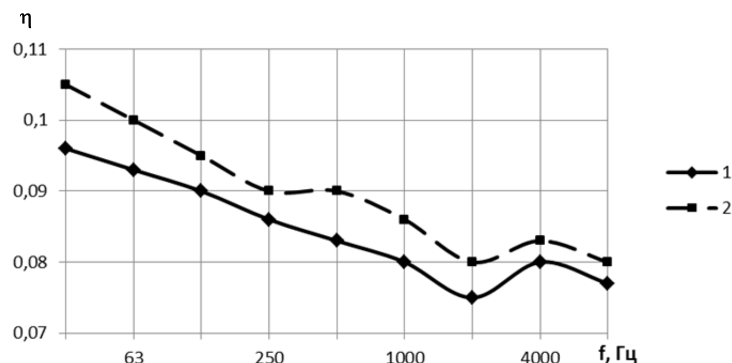


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента потерь колебательной энергии стеклопакета с различным воздушным промежутком: 1 — 10 мм; 2 — 20 мм

Fig. 4. Frequency dependence of the loss index of oscillatory energy of double glass pane with various air gaps: 1 — 10 mm; 2 — 20 mm

Регрессионные зависимости коэффициента потерь колебательной энергии двойного стеклопакета от частоты колебаний для воздушных промежутков 10 и 20 мм имеют следующий вид:

h = 10 мм
ограниченных размеров
h = 20 мм

$$\eta = -4{,}849 + 12{,}452lgf - 12{,}686(lgf)^2 + +6{,}717(lgf)^3 - 1{,}954(lgf)^4 + 0{,}297(lgf)^5 - 0{,}018(lgf)^6. \quad (15)$$

Каждый элемент кабины представляет собой плоскую пластину ограниченных размеров. При расчете структурной составляющей шума в кабине каждый элемент целесообразно представить, как поршневой источник, излучающий звуковую энергию во внутренний воздушный объем кабины. Волны, возбуждаемые каждым поршневым источником, распространяются до соответствующего элемента ограждения, отражаются в обратном направлении, снова отражаются и т.д. В этом случае звуковое поле в кабине представляет собой бесконечное количество положительных и отрицательных волн, налагающихся друг на друга. Причем, поскольку излучается совокупность звуковых волн на собственных частотах колебаний каждого поршневого источника, то результирующие волны получаются сложением всех элементарных волн. Суммарная амплитуда прямых волн определяется как векторная сумма:

$$a = \sum_1^{k^x} a_i, \quad (16)$$

а обратной (отраженной):

$$b = \sum_1^{k^x} b_i, \quad (17)$$

где количество собственных частот колебаний соответствующего поршневого источника.

В общей форме звуковое давление выражено зависимостью:

$$P(x,t) = \rho_0 c_0 (ae^{-k_0 x} + be^{k_0 x})e^{i\omega t}. \quad (18)$$

Величины a и b определяются из граничных условий. Пример расчета показан для координаты x. Для координаты y и z расчет выполняется аналогично с учетом других длин пробега звуковых волн (l_3 и l_2 — соответственно).

Расчет звукового давления основан на приведенных ниже соотношениях.

	$x = 0$	$x = l_1$
	z_0	z_e
сила	$P_{(0)}e^{i\omega t}$	$P_l e^{i\omega t}$
скорость	$V_{mn(0)}$	$V_{mn(l_1)}$
давление	$P_0 e^{i\omega t}$	$P_l e^{i\omega t}$
граничные условия	$z_0 V_0 + S_0 P_0$	$z_e V_e + S_e P_{e_1}$,

где z — импеданс поршня определяемый формулами.

Подставляя значения $P(x,t)$ при $x = 0$ и $x = l_1$ в граничные условия, получается система из двух уравнений.

$$\begin{cases} (z_0 + S_0\rho_0 c_0)a \; + \\ +(z_0 - S_0\rho_0 c_0)b = \psi_0 \\ (z_e - S_e\rho_0 c_0)ae^{-k_0 l} + \\ +(z_e - S_e\rho_0 c_0)be^{k_0 l} = \psi_e \end{cases}. \quad (19)$$

Выводы. Из системы (19) определяются коэффициенты a и b, подставляются в зависимость звукового давления (18), что и позволяет выполнить инженерный расчет спектров шума в кабинах, имеющих большую площадь остекления и определить наиболее эффективные способы по достижению нормативных величин уровней звукового давления. Следует отметить, что полученные результаты фактически универсальны для рассматриваемого класса кабин машин различного функционального назначения.

Библиографический список

1. Шаров, Н. С. Применение звукоизолирующих капотов в машинном помещении/ Борьба с шумом, вибрациеййи акустическим загрязнениемйокружающей среды в строительстве и промышленности, строительных материалов // Н. С. Шаров. —Ленинград : ЛДНТП, 1987 — С. 82–86.

2. Дроздова, Л. Ф. Капоты силовых установок как средство ближней звукоизоляции источников шума / Ф. Л. Дроздова // Методы и средства снижения шума мелиоративных машин. — Сер. 5,6. — Вып. 3. — Москва : ЦНИИТЭСтроймаш, 1984. — С. 22–33.

3. Авилова, Г. М. Экспериментальное исследование звукоизоляции оболочек различной формы / Г. М. Авилова // Акустический журнал. — 1982 — Т. 28,5 — С. 696–697.

4. Клюкин, И. И. Об оценке эффективности звукоизолирующих кожухов для механизмов и о некоторых способах ее увеличения / И. И. Клюкин // Труды ЛЭТИ. — 1966. — №68. — С. 264–275.

5. Иванов, Н. И. К расчету звукоизолирующих капотов, устанавливаемых на самоходные и передвижные машины / Н. И. Иванов, Л. Ф. Дроздова // Труды ЛИИЖТа. — 1977. — Вып. 48. — С. 57–74.

6. Справочник проектировщика. Защита от шума / под ред. Е. Я. Юдина. — Москва : Стройиздат, 1974. — 134 с.

7. Колесников, И. В. Основы акустического проектирования кабин машинистов (теория и практика) / И. В. Колесников, Ю. В. Пронников, А. Н. Чукарин // Монография. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2012. — 120 с.

8. Иванов, Н. И. Основы виброакустики: Учебник для вузов / Н. И. Иванов, А. С. Никифоров. — Санкт-Петербург : Политехника, 2000. — 482 с.

9. Никифоров, А. С. Акустическое проектирование судовых конструкций / А. С. Никифоров. — Ленинград : Судостроение, 1990. — 200 с.

10. Бондаренко, В. А. Снижение шума тяжелых мостовых кранов путем улучшения виброакустических характеристик редукторов : (теория и практика) / В. А. Бондаренко, С. А. Раздорский, А. Ч. Эркенов; Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Ростовский гос. ун-т путей сообщ.". — Ростов-на-Дону : РГУПС, 2015. — 177 с.

11. Подуст, С. Ф. Основы виброакустических расчетов отечественных электровозов: монография / С. Ф. Подуст, А. Н. Чукарин, И. В. Богуславский. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2013. — 160 с.

References

1. Sharov, N.S. Primenenie zvukoizoliruyushchikh kapotov v mashinnom pomeshchenii. Bor'ba s shumom, vibratsiey i akusticheskim zagryazneniem okruzhayushchey sredy v stroitel'stve i promyshlennosti, stroitel'nykh materialov [Application of soundproof hoods in machine room. Control of noise, vibration and acoustic contamination of the environment in construction and industry of building materials.] Leningrad: LDNTP, 1987, pp. 82–86 (in Russian).

2. Drozdova, L.F. Kapoty silovykh ustanovok kak sredstvo blizhney zvukoizolyatsii istochnikov shuma. [Hoods of power plants as means of near sound insulation of noise sources.] Metody i sredstva snizheniya shuma meliorativnykh mashin. [Methods and means of reducing noise of land reclamation machines.] Ser. 5-6, iss.3. Moscow: TsNIITEStroymash, 1984, pp. 22–33 (in Russian).

3. Avilova, G.M., et al. Eksperimental'noe issledovanie zvukoizolyatsii obolochek razlichnoy formy. [Experimental study of sound insulation of shells of various shapes.] Akusticheskiy zhurnal, 1982, vol. 28, no. 5, pp. 696–697 (in Russian).

4. Klyukin, I.I. Ob otsenke effektivnosti zvukoizoliruyushchikh kozhukhov dlya mekhanizmov i o nekotorykh sposobakh ee uvelicheniya. [On efficiency estimation of soundproof enclosures for mechanisms, and on some ways to increase it.] LETI Proc., 1966, no. 68, pp. 264–275 (in Russian).

5. Ivanov, N.I., Drozdova, L.F. K raschetu zvukoizoliruyushchikh kapotov, ustanavlivaemykh na samokhodnye i peredvizhnye mashiny. [To the calculation of soundproof hoods installed on self-propelled and mobile machines.] LIIZhT Proc., 1977, iss. 48, pp. 57–74 (in Russian).

6. Yudin, E.Y., ed. Spravochnik proektirovshchika. Zashchita ot shuma. [Reference book of designer. Noise protection.] Moscow: Stroyizdat, 1974, 134 p. (in Russian).

7. Kolesnikov, I.V., Pronnikov, Y.V., Chukarin, A.N. Osnovy akusticheskogo proektirovaniya kabin mashinistov (teoriya i praktika). Monografiya. [Basics of acoustic design of driver cabs (theory and practice). Monograph.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2012, 120 p. (in Russian).

8. Ivanov, N.I., Nikiforov, A.S. Osnovy vibroakustiki.: [Basics of vibroacoustics.] St. Petersburg: Politekhnika, 2000, 482 p. (in Russian).

9. Nikiforov, A.S. Akusticheskoe proektirovanie sudovykh konstruktsiy. [Acoustic design of ship structures.] Leningrad: Sudostroenie, 1990, 200 p. (in Russian).

10. Bondarenko, V.A., Razdorskiy, S.A., Erkenov, A.C. Snizhenie shuma tyazhelykh mostovykh kranov putem uluchsheniya vibroakusticheskikh kharakteristik reduktorov: (teoriya i praktika). [Noise reduction of heavy bridge cranes through improving vibroacoustic characteristics of reducers: (theory and practice).] Rostov-on-Don: RGUPS, 2015, 177 p. (in Russian).

11. Podust, S.F., Chukarin, A.N., Boguslavskiy, I.V. Osnovy vibroakusticheskikh raschetov otechestvennykh elektrovozov: monografiya. [Basics of vibro-acoustic calculations of domestic electric locomotives: monograph.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2013. — 160 c. (in Russian).

Поступила в редакцию 22.03.2017
Сдана в редакцию 23.03.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 22.03.2017
Submitted 23.03.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Бондаренко Вероника Александровна,
доцент кафедры «Основы проектирования машин» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0995-8579
bva_rek@rgups.ru

Финоченко Татьяна Анатольевна
заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6308-9469
fta09@bk.ru

Authors:

Bondarenko, Veronika A.,
associate professor of the Machine Design Principles Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2,), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0995-8579
bva_rek@rgups.ru

Finochenko, Tatyana A.,
head of the Life Protection Sciences Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2,), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6308-9469
fta09@bk.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621. 762. 1 10.23947/1992-5980-2017-17-3-103-109

Кинетика возникновения трещин в осаживаемых цилиндрических образцах*

М. С. Егоров[1], Р. В. Егорова[2], В. Н. Пустовойт[3], Г. А. Баглюк[4]**

[1,2,3] Донской государственный технический университет, г.Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[4] Институт проблем материаловедения имени И. Н. Францевича НАН Украины

Crack initiation kinetics in upset cylindrical samples***

M. S. Yegorov[1], R. V. Yegorova[2], V. N. Pustovoyt[3], G. A. Baglyuk[4]***

[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[4] Frantsevich Institute of Materials Science Problems, National Academy of Sciences of Ukraine

Введение. Статья посвящена анализу трещинообразования в порошковом теле, а также выявлению основных законов трещинообразования в свободно осаженном материале. Цели работы — изучение кинетики возникновения и распространения трещин в свободно осаженных порошковых материалах, микроструктуры легированных и железных порошков в различных зонах с целью определения условий бездефектного деформирования материала в условиях свободной осадки. Анализ развития трещин в порошковом теле имеет важное практическое значение, поэтому исследование этого вопроса является важной составляющей изготовления бездефектных деталей

Материалы и методы. Рассмотрены новые порошковые материалы шведской фирмы Хеганес, которые характеризуются улучшенными характеристиками деформируемости. Также данные материалы отличаются наличием легированных элементов — Ni и Mo, которые влияют на трещинообразование. В работе проведен анализ микроструктур осаженных образцов с помощью металлографического микроскопа.

Результаты исследования. Трещины в осаженных материалах классифицируются как трещины отрыва. Происхождение трещин обуславливается отсутствием факторов для проявления пластичности металлической составляющей образца ввиду наличия дефектов и пор в его теле. Установлено, что быстрый рост трещин подтверждается характером трещины, когда она практически не имеет продолжения в материал образца и, кроме того, заканчивается под углом к направлению развития.

Обсуждение и заключения Проведенный анализ развития микротрещин позволяет выявить морфологические отличия структуры центральной и периферийной зон порошкового материала. Периферийная область характеризуется различными значениями зерен и увеличенным содержанием микропор, направленностью скоплений микронесплошностей и неметаллических включений, в направлении бывших границ физического раздела частиц металлического порошка.

Introduction. The article is devoted to the crack occurrence analysis in a powder body, and identification of the basic laws of this process in the freely upset material. The work objective is to study kinetics of crack initiation and propagation in freely upset powder materials, and microstructure of alloy and iron powders in a variety of areas in order to determine the conditions for defect-free deformation of the material under free upsetting. The analysis of the crack development in a powder body is of great practical importance, and therefore, the investigation of this problem is essential for the fabrication of accepted parts.

Materials and Methods. New powder materials from the Swedish company Höganäs which are characterized by the improved deformation characteristics are considered. Besides, these materials differ in occurrence of alloy elements, such as *Ni* and *Mo* which affect cracking. Microstructures of the upset samples are analyzed using the metallographic microscope.

Research Results. Cracks in the upset materials are classified as cleavage cracks. The crack origin is determined by the absence of factors for the development of the sample metal component plasticity due to the occurrence of defects and pores in its body. It is established that rapid cracking is confirmed by the nature of the crack when it scarcely has extension into the sample material, and, moreover, ends at an angle to the area for development.

Discussion and Conclusions. The analysis of the microcrack development allows identifying morphological structural differences of the central and fringe regions of the powder material. The peripheral area is characterized by different values of grains and increased content of micropores, and the directivity of clusters of micro-discontinuities and non-metallics, in the line of the former physical interface of the metal powder particles.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: aquavdonsk@mail.ru, gbag@rambler.ru, fipm-dstu@mail.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Ключевые слова: порошковая металлургия, горячая деформация, микроструктура, свободная осадка, трещины.

Keywords: powder metallurgy, hot deformation, microstructure, free upsetting, cracks

Образец для цитирования: Егоров, М. С. Кинетика возникновения трещин в осаживаемых цилиндрических образцах / М. С. Егоров, Р. В. Егорова, В. Н. Пустовойт, Г. А. Баглюк // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 103–109.

For citation: M. S. Yegorov, R.V. Yegorova, V. N. Pustovoyt, G. A. Baglyuk. Crack initiation kinetics in upset cylindrical samples. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 103–109.

Введение. Производство изделий, имеющих сложную технологическую форму, методом горячей штамповки из цилиндрических заготовок приводит к развитию боковой деформации на периферийной поверхности [1–3].

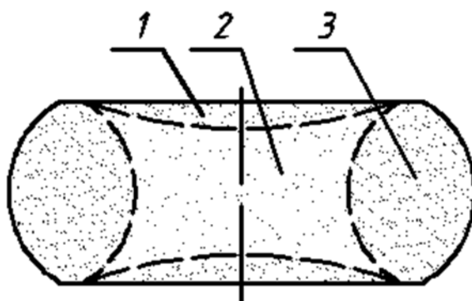


Рис. 1. Основные области деформации при свободной осадке образца

Fig. 1. Base deforming regions under free sample upsetting

На рис. 1 изображена схема распределения зон в объеме деформированного образца. Учитывая то, что при анализе полученных данных стоит задача рассмотреть роль этих областей на процесс деформации материала, приведем описание каждой области. Области минимальной деформации (1), претерпевают минимальную высотную и радиальную деформации; максимальная область осевой и радиальной деформации (2) имеет максимальную плотность; область наличия тангенциальных растягивающих напряжений (3) имеет минимальную плотность.

Следует отметить, что деформация образца в радиальном направлении, приводящая к увеличению его размера в средней части, создается двумя видами напряжений: основными (сжимающие) и дополнительными (растягивающими).

Сжимающие напряжения в образце возникают в результате действия деформирующих усилий. Эти напряжения деформирую частицы не только в направлении действия деформирующих усилий, но и в поперечном направлении, что приводит к увеличению размеров образца. Сжимающие напряжения в третьей области (рис. 1) не вызывают появления дефектов, так как их взаимодействие в этой области приводит к сжиманию материала, а это значит, что предельные дополнительные (растягивающие) напряжения на поверхностях частиц не возникают.

Напряжения в третьей области являются в большей степени растягивающими. Их влияние обусловлено различной способностью первой и третьей областей деформироваться. Первая область стремится к увеличению размеров (более интенсивное деформирование в радиальном направлении), что и приводит к появлению дополнительных напряжений. Установлено, что деформация в поперечном направлении первой области возможна после уменьшения пористости, а, как следствие, и плотности материала. Дополнительные напряжения, которые возникают в процессе деформации, действуют на крайние металлические частицы материала, приводя изменение их параметров, что связано с увеличением объема детали. Когда порошковый материал достигает предельных значений дополнительных растягивающих напряжений происходит полное разрушение. Это приводит к появлению продольных трещин на бочкообразной поверхности осаживаемого образца.

Экспериментальная часть. Анализ кинетики распространения трещин проводился на образцах, выполненных из порошкового материала Astaloy 85 Mo, легированного 0,85% молибдена шведской фирмы «Höganäs». Рассматриваемый материал имеет хорошую степень прессуемости и обладает однородной микроструктурой после спекания. Свободную деформацию нагретых пористых образцов проводили без матрицы, что обусловило наличие сухого трения на контактных поверхностях. Для этого применялся молот с весом ударной части 500Н. Подготовленные после свободной осадки микрошлифы изучали с помощью металлографического микроскопа METAVERT (фирмы REICHERT, Австрия) [4].

Обсуждение и результаты. Детальное описание трещинообразований, возникающих при различных напряженно-деформированных состояниях монолитных материалов, рассмотрена в [5,6]. Трещины, получаемые после

динамического горячего прессования, можно классифицировать как трещины отрыва. Основанием для этого могут служить следующие признаки:

1) возникновение дефекта в виде трещины начинается на наружной (бочкообразной) поверхности образца. Для рассматриваемых материалов инициаторами возникновения трещин могут быть дефекты, возникающие на межчастичной поверхности сращивания около боковой поверхности, которые играют роль концентраторов напряжений. Развитие микротрещины на поверхности материала происходит в местах этих дефектов за счет уменьшения межчастичных связей порошка. В процессе динамического прессования возникают участки с разным уровнем межчастичного сращивания. Именно такие участки и могут быть областями облегченного развития трещин. Таким образом, происхождение трещин обусловлено отсутствием факторов для проявления пластичности металлической составляющей образца ввиду наличия указанных дефектов и пор в его теле;



Рис. 2. Трещина на поверхности осаженного порошкового образца Astaloy 85 Mo (×100).
Пористость P = 30%; $t_н$ = 950 °С; τ = 10 мин

Fig. 2. Crack on upset powder sample surface: Astaloy 85 Mo (×100)*;*
porosity P = 30%; $t_н$ = 950 °C*;* τ = 10 min

2) появляющиеся трещины можно отнести к простым, так как на поверхности они имеют форму неразветвленных полосок, расположенных вдоль образующей цилиндрической поверхности образца (рис. 2);

3) исследуемые трещины имеют распространение в радиальной вертикальной плоскости 1–1 относительно оси образца (рис. 2);

4) увеличение трещин происходит в горизонтальной плоскости 2–2, нормальной к плоскости ее распространения, т.е. 1–1 (рис. 3).

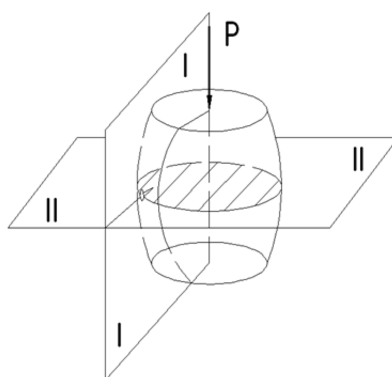


Рис. 3. Обозначение расположения плоскостей распространения 1–1 и
раскрытия 2–2 трещин при свободной деформации материла

Fig. 3. Marking lay-out of planes of crack propagation 1–1
and crack opening 2–2 under free deformation of the material

Дополнительные растягивающие напряжения в периферийном кольцевом объеме пористого материала имеют пиковое значение, что обусловлено наличием пор. Такое состояние вызывает напряжения, которые вызывают нарушение однородности пористого тела прежде, чем средние напряжения достигают для него предела текучести. Зарождение трещин начинается на периферии межчастичной поверхности, характеризующейся малым качеством сращивания, ослабленными растягивающими напряжениями, действующими при горячей деформации.

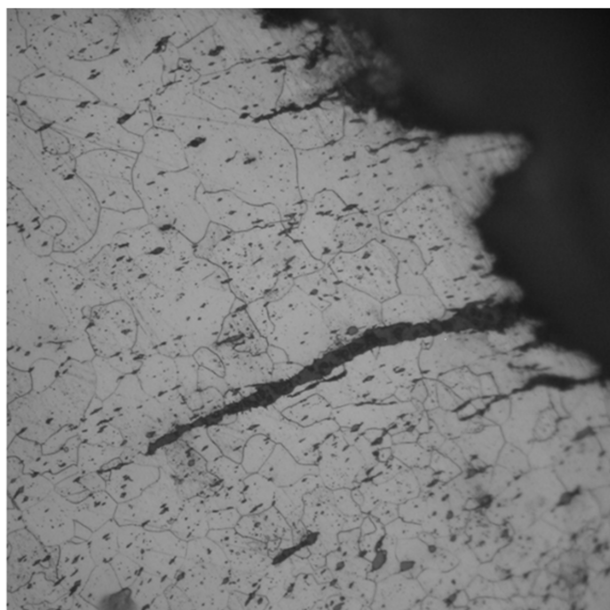


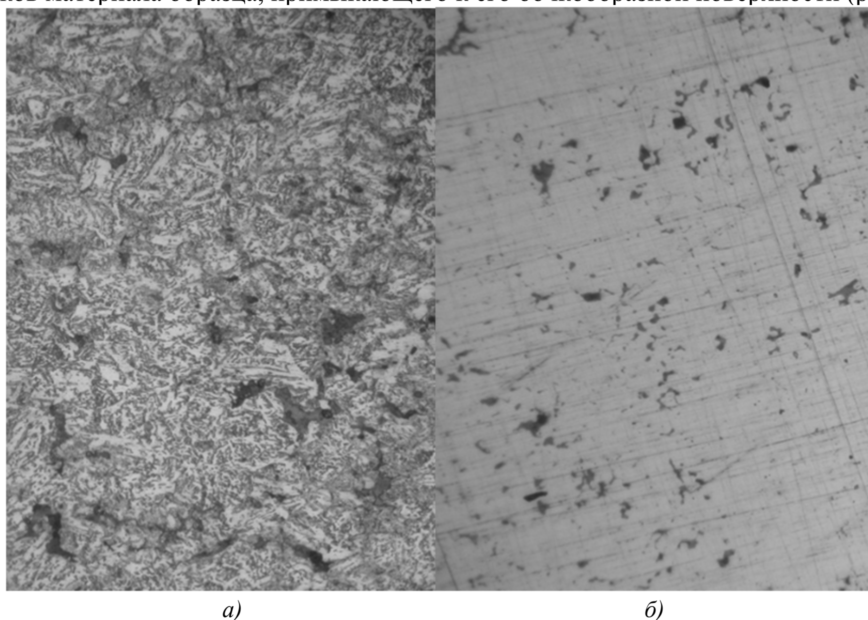
Рис. 4. Трещина расположенная в плоскости 2–2 при осадке образца:
спеченный Astaloy 85 Mo (×100): P=30%; $t_н$ =950^0; τ = 100 мин

Fig. 4. Crack located in 2 –2 plane under sample upsetting:
sintered Astaloy 85 Mo (×100): P=30%; $t_н$ *=950*^{0}*; ; τ = 100 min*

Развитие трещины происходит по межчастичной поверхности сращивания согласно механизму разрушения металлического каркаса между порами. Скорее всего, развитие трещины у образцов, как результат низкой пластичности материала, следует рассматривать поэтапно. Предлагаются следующие этапы возникновения трещин при свободной осадке образцов.

Этап первый. Общее уменьшение пористости материала на некоторое расстояние вглубь образца в районе бочки (рис. 5б).

Экспериментально показано, что пластическое «разрыхление» можно оценить остаточным увеличением объема металла [7,8]. Положения о «разрыхлении» материала образца при его пластическом деформировании подтверждаются при испытании порошковых образцов [9,10]. Однако, необходимо учитывать происходящее в центральной части образца уплотнение, а понятие о «разрыхлении» в большей мере пригодно для оценки состояния периферийных участков материала образца, примыкающего к его бочкообразной поверхности (рис. 5б).



а) *б)*

Рис. 5. Микроструктура периферийной области образца до (а) и после (б) деформации для образцов (×100):
спеченный Astaloy 85 Mo; пористость начальная 20%; $t_н$ =950 °С; τ = 100 мин

Fig. 5. Microstructure of sample peripheral region before (a) and after (b) deformation for samples (×100):
sintered Astaloy 85 Mo; initial porosity = 20%; $t_н$ =950 °С*; ; τ = 100 min*

«Разрыхление» периферийной области образца происходит с некоторым относительным перемещением и поворотом частиц порошка, которое сопровождается разрыванием и возникновением металлических связей между

ними. Кроме этого, порошок деформируясь изменяет форму в направлении действующих напряжений. Такое поведение микрочастиц в периферийной зоне образца приводит к возникновению субмикро- и микроразрушений на границах частиц порошка. Однако, эти механизмы на первом этапе зарождения трещин не могут привести к их рождению, так как максимальные напряжения еще выражены незначительно. Нарушение «целостности» структуры образца путем визуального осмотра при увеличении до $\times 60$ обнаружить не удается.

Третий этап. Локальное разрыхление мест на периферийной поверхности с образованием дефектов в процессе деформации. Во время этого этапа зарождаются трещины, напряжения достигают своего максимума. Скопление субмикро- и микроразрушений между определенными частицами порошка достигает своего порогового значения, превращаясь в макроразрушения в виде трещин.

К концу рассматриваемого этапа образования трещин, бочкообразная поверхность в районе ее максимального диаметра получает некоторое «разрыхление» своей исходной структуры, что вызвано действием дополнительных растягивающих напряжений.

Этап третий. Мгновенный рост трещины, характерный ее значительным распространением в горизонтальной плоскости 1–1 и раскрытием в вертикальной плоскости 2–2 (рис. 6) при сравнительно небольшом приращении удельной работы деформирования.

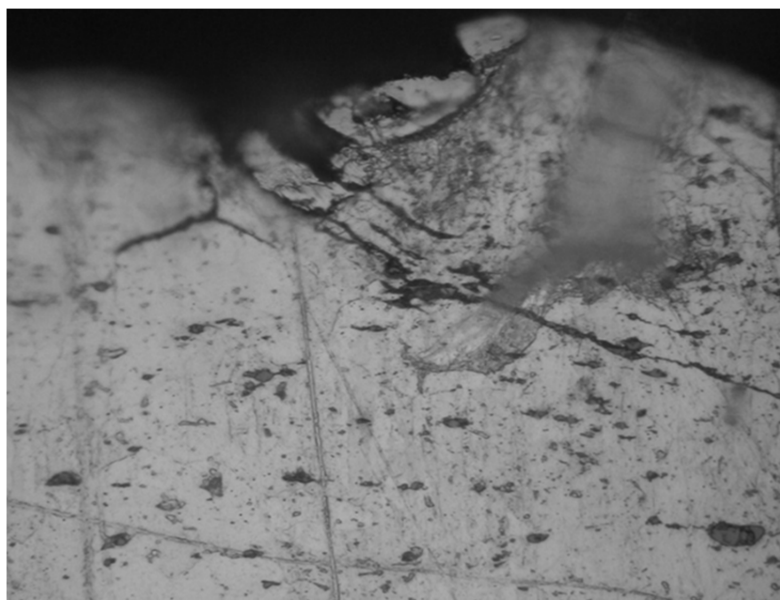


Рис. 6. Начало зарождения трещины ×200

Fig. 6. Beginning of crack initiation ×200

Следует заметить отметить, что быстрый рост трещин на последнем этапе подтверждается характером трещины, когда она практически не имеет продолжения в материал образца и, кроме того, заканчивается под углом к направлению развития.

Выводы. Проведенный анализ возникновения, развития микротрещин позволяет выявить морфологические отличия структуры центральной и периферийной зон порошкового материала. Периферийная область характеризуется различными значениями зерен и увеличенным содержанием микропор, направленностью скоплений микронесплошностей и неметаллических включений в направлении бывших границ физического раздела частиц металлического порошка.

Библиографический список

1. Егорова, Р. В. Микроструктурный анализ поверхности деталей ступенчатой формы / Р. В. Егорова // Металлург. — 2009. — №6. — С.65–67.

2. Синельщиков, В. В. Оценка пластичности пористого материала в нагретом состоянии для свободной осадки образцов / В. В. Синельщиков, А. С. Разумный // Порошковые и композиционные материалы и изделия : сб. науч. тр. — Новочеркасск : ЮРГТУ, 2000. — С.35–41.

3. Григорьев, А. К. Деформация и уплотнение порошковых материалов / А. К. Григорьев, А. И. Рудской. — Москва :Металлургия, 1992. — 192 с.

4. Егорова, Р. В. Структура и свойства порошковых спеченных материалов для горячей штамповки деталей сложной формы : дисс. канд. техн. наук / Р. В. Егорова. — Ростов-на- Дону, 2013. — 163с.

5. Губкин, С. И. Деформируемость металлов / С. И. Губкин. — Москва : Металлургиздат, 1953. — 200с.
6. Егорова, Р. В. Свободная осадка нагретых цилиндрических образцов порошковых материалов ASTALOY 85 MO, DISTALOY HP фирмы «Höganäs»/ Р. В. Егорова, М. С. Егоров, А. В. Скориков // Металлург. — 2013. — №5. — С.82–86.
7. E. Robert-Perron, C. Blais & S. Pelletier. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state / E. Robert-Perron, C. Blais & S. Pelletier // Powder Metallurgy — 2009. — Vol. 52, no. 1. — P. 80 – 83.
8. Синельщиков, В. В. Исследование свойств нагретых пористых порошковых материалов при динамических нагрузках : дисс. канд. техн. наук / В. В. Синельщиков. — Новочеркасск, 1979. — 186с.
9. Егорова, Р. В. Особенности формирования межчастичного сращивания в условиях уплотнения при наличии растягивающего напряженного состояния / Р. В. Егорова // Материалы и механизмы морского транспорта. Методы исследования и упрочнения. Технология производства : матер. междунар. науч.-техн. конф. — Севастополь, 2008. — С.78–82.
10. Дорофеев, В. Ю. Межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедеформированных материалов / В. Ю. Дорофеев, С. Н. Егоров. — Москва, 2003. — с. 152.

References

1. Yegorova, R.V. Mikrostrukturnyy analiz poverkhnosti detaley stupenchatoy formy. [Microstructure analysis of surface for details of stepped form.] Metallurgist, 2009, no. 6, pp. 65–67 (in Russian).
2. Sinelshchikov, V.V., Razumny, A.S. Otsenka plastichnosti poristogo materiala v nagretom sostoyanii dlya svobodnoy osadki obraztsov. [Estimation of porous material plasticity in heated state for free upsetting of samples.] Poroshkovye i kompozitsionnye materialy i izdeliya: sb. nauch. tr. [Powder and composite materials and products: Coll. Sci. papers.] Novocherkassk: YuRGTU, 2000, pp. 35–41 (in Russian).
3. Grigoryev, A.K., Rudskoy, A.I. Deformatsiya i uplotnenie poroshkovykh materialov. [Deformation and compaction of powder materials.] Moscow: Metallurgiya, 1992, 192 p. (in Russian).
4. Yegorova, R.V. Struktura i svoystva poroshkovykh spechennykh materialov dlya goryachey shtampovki detaley slozhnoy formy: diss. kand. tekhn. nauk. [Structure and properties of powder sintered materials for hot stamping of complex parts: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 2013, 163p. (in Russian).
5. Gubkin, S.I. Deformiruemost' metallov. [Deformability of metals.] Moscow: Metallurgizdat, 1953, 200 p. (in Russian).
6. Yegorova, R.V. Svobodnaya osadka nagretykh tsilindricheskikh obraztsov poroshkovykh materialov ASTALOY 85 MO, DISTALOY HP firmy «Höganäs». [Free upset of heated cylindrical samples of powders ASTALOY 85 MO and DISTALOY HP-1 of firm «Höganäs».] Metallurgist, 2013, no. 5, pp. 82–86 (in Russian).
7. E. Robert-Perron, C. Blais & S. Pelletier. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state. Powder Metallurgy, 2009, vol. 52, no. 1, pp. 80 – 83.
8. Sinelshchikov, V.V. Issledovanie svoystv nagretykh poristykh poroshkovykh materialov pri dinamicheskikh nagruzkakh: diss. kand. tekhn. nauk. [Investigation of properties of heated porous powder materials under dynamic loads: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Novocherkassk, 1979, 186 p. (in Russian).
9. Yegorova, R.V. Osobennosti formirovaniya mezhchastichnogo srashchivaniya v usloviyakh uplotneniya pri nalichii rastyagivayushchego napryazhennogo sostoyaniya. [Formation specifics of interparticle splicing under compaction conditions in the presence of stretching stress state.] Materialy i mekhanizmy morskogo transporta. Metody issledovaniya i uprochneniya. Tekhnologiya proizvodstva: mater. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Materials and mechanisms of sea transport. Methods of research and hardening. Production technology: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.] Sevastopol, 2008, pp. 78–82 (in Russian).
10. Dorofeev, V.Y., Yegorov, S.N. Mezhchastichnoe srashchivanie pri formirovanii poroshkovykh goryachedeformirovannykh materialov. [Interparticle splicing under the formation of hot powdered materials.] Moscow: Metallurgizdat, 2003, 151 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 14.04.2017
Сдана в редакцию 14.04.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 14.04.2017
Submitted 14.04.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Егоров Максим Сергеевич,
доцент кафедры «Технология машиностроения», Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4289-1601
aquavdonsk@mail.ru

Егорова Римма Викторовна,
старший преподаватель кафедры «Технический сервис и информационные технологии» Института технологии (филиал) Донского государственного технического университета (ДГТУ) (РФ, г. Волгодонск, ул. Мира, 16), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1082-3970
aquavdonsk@mail.ru

Пустовойт Виктор Николаевич,
заведующий кафедрой «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1276-5249
fipm-dstu@mail.ru

Баглюк Геннадий Анатольевич,
заместитель директора по науке Института проблем материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины (Украина, 03142, Киев, ул. Академика Кржижановского, 3), доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3305-8896
gbag@rambler.ru

Authors:

Yegorov, Maxim S.,
associate professor of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4289-1601
aquavdonsk@mail.ru

Yegorova, Rimma V.,
senior lecturer of the Technical Service and Information Technologies Department, Institute of Technology (DSTU branch) (RF, Volgodonsk, ul. Mira, 16), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1082-3970
aquavdonsk@mail.ru

Pustovoyt, Victor N.,
head of the Material Physics and Applied Hylology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1276-5249
fipm-dstu@mail.ru

Baglyuk, Gennady A.,
Associate Director on Research, Frantsevich Institute of Materials Science Problems, National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, 03142, Kiev, ul. Akademika Krzhizhanovskogo, 3), Dr.Sci. (Eng.), senior research scholar,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3305-8896
gbag@rambler.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 51:621.891 10.23947/1992-5980-2017-17-3-110-116

Расчетная модель подшипника скольжения*

М. А. Савенкова[1], К. С. Солоп[2]**

[1,2] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Computational model of sliding bearing***

M. A. Savenkova[1], K. S. Solop[2]**

[1,2] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В работе описаны уточненные расчетные модели трибосистем с учетом зависимости вязкости и проницаемости пористого покрытия от давления при частичном заполнении рабочего зазора смазочным материалом. Полученные расчетные модели позволяют выполнить сравнительный анализ вновь полученных и уже имеющихся результатов, что подтверждает большую приближенность новых моделей к реальной.

Материалы и методы. На основе уравнений движения жидкого смазочного материала для случая «тонкого слоя» и уравнения Дарси определены значения поля скоростей и давления в смазочном слое. В пористом покрытии на поверхности шейки вала определены основные рабочие характеристики подшипников скольжения.

Результаты исследования. Разработана математическая модель радиального подшипника, позволяющая на основе численного анализа определять поля скоростей, давление, несущую способность и силу трения с учетом зависимости от ряда дополнительных факторов.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе и в инженерной практике трибосистем машиностроения.

Introduction. Refined computational models of tribosystems taking into account the dependence of viscosity and permeability of the porous coating on pressure through partial filling of the front gap with lubricant are described. The obtained calculated models allow for a comparative analysis of the newly received and already available results which confirms a great proximity of the new models to the actual one.

Materials and Methods. Values of velocities and pressure field are specified on the basis of the liquid lubricant flow equations for the case of a “thin layer” and Darcy equation. The key operating characteristics of the friction bearings are determined in the porous coating on the journal surface.

Research Results. A mathematical model of a radial bearing which allows determining velocity fields, pressure, load capacity, and friction force, with account of the dependence on a number of additional factors, is developed on the basis of the numerical analysis.

Discussion and Conclusions. The obtained results can be used in the educational process, as well as in the engineering practice of machine-building tribosystems.

Ключевые слова: радиальный подшипник, гидродинамика, вязкость, проницаемость, неполное заполнение.

Keywords: radial bearing, hydrodynamics, viscosity, permeability, underfilling.

Образец для цитирования: Савенкова, М. А. Расчетная модель подшипника скольжения / М. А. Савенкова, К. С. Солоп // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 110–116.

For citation: M.A. Savenkova, K.S. Solop. Computational model of sliding bearing. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 110–116.

Введение. В настоящее время развитие машиностроения характеризуется увеличением в современных двигателях мощности поршневых и роторных машин. Повышение требований к их надежности и долговечности приводит к неизбежному росту нагруженности и сопряжений трибосистем. Ключ к решению этой проблемы лежит в совершенствовании конструкций узлов трения трибосистем. Наличие смазочного материала в трибосистемах обеспечивает режим жидкостного трения, при котором потери достаточно малы, а износ трибоузлов минимален. При разработке математических расчетных моделей и конструировании новых, а также при модернизации разработанных трибосистем необходимо уделять повышенное внимание происходящим процессам и явлениям, к которым относятся

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail:vm@rgups.ru k1212-kostya@yandex.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

механические, тепловые и химические процессы. Возникает необходимость в разработке новых расчетных моделей трибоузлов, обладающих большой маслоемкостью и демпфирующими свойствами [1–13].

Цель работы. Целью настоящей статьи является разработка расчетной модели трибоузлов с пористым покрытием при частичном заполнении рабочего зазора с учетом зависимости проницаемости и вязкости от давления.

Постановка задачи. Рассматривается установившееся движение трибосистемы с пористым покрытием. Вал вращается с угловой скоростью Ω, а подшипник неподвижен. Пространство между валом и подшипником не полностью заполнено смазочным материалом (рис. 1).

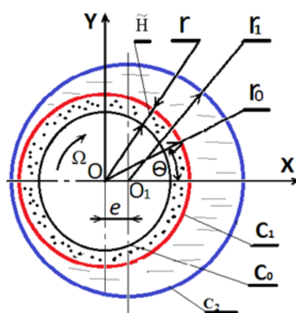


Рис. 1. Рабочая схема

Fig. 1. Functional diagram

В полярной системе координат с полюсом в центре вала уравнение контуров вала с пористым покрытием C_0 и C_1 и подшипниковой втулки C_2 задается в виде:

$$C_0:\ r = r_0 - \widetilde{H};\quad C_1:\ r' = r_0;$$
$$C_2:\ r' = r_1 \cdot (1 + H) = r_1 + e\cos\theta;$$
$$H = \varepsilon\cos\theta - \frac{1}{2}\varepsilon^2\sin^2\theta;\quad \varepsilon = \frac{\varepsilon}{r_1} < 1 \tag{1}$$

где r_1 — радиус подшипника скольжения; r_0 — радиус вала с пористым покрытием; H — толщина пористого слоя; H — толщина смазочного материала; e — эксцентриситет.

Зависимость вязкости и проницаемости задается в виде:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha p'},\qquad k' = k_0 e^{\alpha p'}, \tag{2}$$

где μ_0 — характерная вязкость, k_0 — характерная проницаемость пористого слоя; $\tilde{\alpha}$ — экспериментальная постоянная величина, p' — гидродинамическое давление в смазочном слое, μ' — коэффициент динамической вязкости смазочного материала, k' — проницаемость пористого покрытия.

Исходные уравнения и граничные условия.

Исходными уравнениями являются уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости для случая «тонкого слоя», неразрывности и Дарси с учетом (2).

$$\frac{\partial^2 u'}{\partial r'^2} = \frac{1}{\mu'}\frac{\partial p'}{\partial\theta},\qquad \frac{\partial v'}{\partial r'} + \frac{\partial u'}{\partial\theta} = 0,$$
$$\frac{\partial^2 p'}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'}\frac{\partial p'}{\partial r'} + \frac{1}{r'^2}\frac{\partial^2 p'}{\partial\theta^2} = 0. \tag{3}$$

Связь между размерными и безразмерными переменными задается в следующем виде:

– в смазочном слое:

$$\widetilde{\alpha}=\frac{\alpha}{p^*},\quad u'=\Omega r_0 u,\quad v'=\Omega\delta v,\quad p'=p^* p,\quad \mu'=\mu_0\mu,$$
$$r'=r_0+\delta r,\quad \delta=r_1-r_0,\quad p^*=\frac{\mu_0\Omega r_0^2}{\delta^2}. \tag{4}$$

– в пористом слое:

$$r'=Hr^*,\quad k'=k_0 k,\quad P'=p^* P. \tag{5}$$

Здесь u', v' — компоненты вектора скорости, p' — гидродинамическое давление в смазочном слое, P' — гидродинамическое давление в пористом слое.

С учетом (4) и (5) уравнение (3) примет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}=\frac{1}{e^{\alpha p}}\frac{\partial p}{\partial\theta},\quad \frac{\partial v}{\partial r}+\frac{\partial u}{\partial\theta}=0,\quad \frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}}+\frac{1}{r^*}\frac{\partial P}{\partial r^*}+\frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^2 P}{\partial\theta^2}=0. \tag{6}$$

И соответсвующими граничными условиями:

$$u\big|_{r=0}=1,\quad v\big|_{r=0}=-N\frac{\partial p}{\partial r^*}\Big|_{r^*=\frac{r_0}{\widetilde{H}}},\quad u=0,\quad v=0\quad при\quad r=1+\eta\cos\theta,$$
$$p(\theta_1)=p(\theta_2)=0,\quad p=P\big|_{r^*=\frac{r_0}{\widetilde{H}}},\quad \frac{\partial p}{\partial r^*}\Big|_{r^*=\frac{r_0}{\widetilde{H}}-1}=0, \tag{7}$$

где $N=\dfrac{k_0 r_0^2}{\delta^3 H},\eta=\dfrac{e}{\delta}.$

Решение функции тока (6), с учетом граничных условий (7), будем искать в виде:

$$u=\frac{\partial\psi}{\partial r}+U(r,\theta),\ v=-\frac{\partial\psi}{\partial\theta}+V(r,\theta),\ U(r,\theta)=\widetilde{u}(\xi),\ V(r,\theta)=-\widetilde{v}(\xi)h'(\theta),$$
$$\xi=\frac{r}{h(\theta)},\quad \psi(r,\theta)=\widetilde{\psi}(\xi),\ \frac{dp}{d\theta}=e^{\alpha p}\left(\frac{\widetilde{c}_1}{h^2(\theta)}+\frac{\widetilde{c}_2}{h^3(\theta)}\right) \tag{8}$$

Подставляя (8) в (6), с учетом (7), получим:

$$\frac{d^3\widetilde{\psi}}{d\xi^3}=\widetilde{c}_2,\quad \frac{d^2\widetilde{u}}{d\xi^2}=\widetilde{c}_1,\quad \frac{d\widetilde{v}}{d\xi}+\xi\frac{d\widetilde{u}}{d\xi}=0,\ \int_0^1\widetilde{u}(\xi)d\xi=\widetilde{v}(0). \tag{9}$$

$$\widetilde{u}(0)=1,\quad \widetilde{v}(0)=-N\frac{\partial p}{\partial r^*}\Big|_{r^*=\frac{r_0}{H}},\quad p(\theta_1)=p(\theta_2)=0,\quad \widetilde{u}(1)=0,\quad \widetilde{v}(1)=0. \tag{10}$$

Решение задачи (9)–(10) находится интегрированием. В результате:

$$\frac{\partial\psi}{\partial\xi}=\frac{\widetilde{c}_2}{2}\left(\xi^2-\xi\right),\qquad \widetilde{u}(\xi)=\widetilde{c}_1\frac{\xi^2}{2}-\left(\frac{\widetilde{c}_1}{2}+1\right)\xi+1. \tag{11}$$

Определение гидродинамического давления.

Для определения безразмерного гидродинамического давления в смазочном слое имеем:

$$e^{-\alpha p}\frac{dp}{d\theta}=\frac{\widetilde{c}_1}{h^2(\theta)}+\frac{\widetilde{c}_2}{h^3(\theta)}, \tag{12}$$

где $h(\theta)=1+\eta\cos\theta.$

Введем обозначение:

$$z=e^{-\alpha p} \tag{13}$$

и, продеффиринцировав обе части равенства по θ, получим:

$$\frac{dz}{d\theta}=-\alpha e^{-\alpha p}\frac{dp}{d\theta}\frac{dz}{d\theta}=-\alpha e^{-\alpha p}\frac{dp}{d\theta} \tag{14}$$

С учетом (14) уравнение (12) запишется в виде:

$$\frac{dz}{d\theta}=-\alpha\left(\frac{\widetilde{c}_1}{h^2(\theta)}+\frac{\widetilde{c}_2}{h^3(\theta)}\right) \tag{15}$$

Интегрируя уравнение (15) с точностью до членов второго порядка малости $O\left(\eta^2\right)$, с учетом $z\left(\theta_1\right)=z\left(\theta_2\right)=1$, получим:

$$z=-\alpha\left(\tilde{c}_1\left(\theta-2\eta\sin\theta\right)+\tilde{c}_2\left(\theta-3\eta\sin\theta\right)\right)+1 \tag{16}$$

Используя граничные условия $z\left(\theta_1\right)=z\left(\theta_2\right)=1$ будем иметь:

$$\tilde{c}_2=-\tilde{c}_1\left(1+\frac{2\eta\cos\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}}{\theta_2-\theta_1}\right) \tag{17}$$

С учетом (17) уравнение (16) примет следующий вид:

$$z=-\alpha\tilde{c}_1\left(\eta\sin\theta-\frac{2\eta\theta\cos\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}}{\theta_2-\theta_1}\right)+1 \tag{18}$$

или

$$e^{-\alpha p}=-\alpha\tilde{c}_1\eta\left(\sin\theta-\frac{2\theta\cos\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}}{\theta_2-\theta_1}\right)+1 \tag{19}$$

Выполняя аналитическое разложение функции $e^{-\alpha p}$ в ряд Тейлора с точностью до членов $O\left(\alpha^2\right)$ включительно, получим:

$$p=\tilde{c}_1\eta\left(\sin\theta-\frac{2\theta\cos\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}}{\theta_2-\theta_1}\right) \tag{20}$$

С учетом (20) давление фильтрующегося смазочного материала в пористом слое будем искать в виде:

$$p\left(r^*,\theta\right)=R\left(r^*\right)\tilde{c}_1\eta\left(\sin\theta-\frac{2\theta\cos\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}}{\theta_2-\theta_1}\right) \tag{21}$$

Подставляя (21) в уравнение Дарси (6) для определения $R\left(r^*\right)$, приходим к следующему дифференциальному уравнению:

$$R''\left(r^*\right)+\frac{R'}{r^*}-\frac{R}{r^{*2}}=0 \tag{22}$$

С граничными условиями:

$$\left.\frac{dR}{dr^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}-1}=0,\quad R\left(\frac{r_0}{\tilde{H}}\right)=1 \tag{23}$$

Непосредственное интегрирование (22) с учетом (23) для функции $R\left(r^*\right)$ позволяет получить выражение:

$$R\left(r^*\right)=\frac{r_0\tilde{H}r^*}{2r_0^2-2\tilde{H}r_0+\tilde{H}^2}+\frac{r_0\left(r_0^2-2\tilde{H}r_0+\tilde{H}^2\right)}{\tilde{H}\left(2r_0^2-2\tilde{H}r_0+\tilde{H}^2\right)r^*} \tag{24}$$

Интегрируя уравнение неразрывности по ξ от 0 до 1, приходим к следующему уравнению:

$$-N\left.\frac{\partial p}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}}=\int_0^1\tilde{u}\left(\xi\right)d\xi \tag{25}$$

С учетом (11), (21) и (24) для c_1 получим следующее выражение:

$$\tilde{c}_1=6\left(1-12NB\left(1-\frac{A\theta}{\sin\theta}\right)\right), \tag{26}$$

где $A = \dfrac{2\cos\dfrac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\dfrac{\theta_2-\theta_1}{2}}{\theta_2-\theta_1}$, $\quad B = \dfrac{\tilde{H}\left(2r_0-\tilde{H}\right)}{r_0\left(2r_0^2-2\tilde{H}r_0+\tilde{H}^2\right)}$

Тогда, с учетом c_1, окончательно для гидродинамического давления получим:

$$p = 6\eta\left(\left(1-12BN\right)\left(\sin\theta - A\theta\right)+12BN\left(A\theta-\frac{A^2\theta^2}{\sin\theta}\right)\right). \tag{27}$$

Определение несущей способности и силы трения.

С учетом (11) и (28) для составляющей вектора поддерживающей силы и силы трения получим выражения:

$$R_y = p^* r_0\int_{\theta_1}^{\theta_2} P\sin\theta d\theta = 6\eta\frac{\mu_0\Omega r_0^3}{\delta^2}\left[\frac{\left(1-12BN\right)}{2}\left(\theta_2-\theta_1+2\sin\left(\theta_2+\theta_1\right)\sin\left(\theta_2-\theta_1\right)\right)-\right.$$
$$-2A\left(\theta_2+\theta_1\right)\sin\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}+2A\cos\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}+ \tag{28}$$
$$\left.12BN\left(2A\left(\theta_2+\theta_1\right)\sin\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}-2A\cos\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}-\frac{A^2}{3}\left(\theta_2-\theta_1\right)^3\right)\right]$$

$$R_x = p^* r_0\int_{\theta_1}^{\theta_2} P\cos\theta d\theta = 6\eta\frac{\mu_0\Omega r_0^3}{\delta^2}\left[\frac{\left(1-12BN\right)}{2}\left(\frac{1}{2}\sin\left(\theta_2+\theta_1\right)\sin\left(\theta_1-\theta_2\right)-\right.\right.$$
$$\left.-A\left(\left(\theta_2-\theta_1\right)2\cos\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}-2\sin\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_1-\theta_2}{2}\right)\right)+$$
$$\left.12BNA\left(\left(\theta_2-\theta_1\right)2\cos\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_2-\theta_1}{2}-2\sin\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_1-\theta_2}{2}\right)\right]$$

$$L_{mp} = \frac{\mu_0\Omega r_0}{\delta}\mu\int_{\theta_1}^{\theta_2}\left(\frac{\psi''(\theta)}{h^2(\theta)}+\frac{\tilde{u}'(\theta)}{h(\theta)}\right)d\theta == \frac{\mu_0\Omega r_0}{\delta}\left(1+\alpha p+\frac{\alpha^2}{2}p^2\right)\left[\begin{array}{l}-\tilde{c}_1\left(1+A\eta\right)\\ \left(\theta_2-\theta_1+4\eta\sin\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_1-\theta_2}{2}\right)+\end{array}\right.$$
$$\left.+\left(\frac{\tilde{c}_1}{2}+1\right)\left(\theta_2-\theta_1+6\eta\sin\frac{\theta_2+\theta_1}{2}\sin\frac{\theta_1-\theta_2}{2}\right)\right]$$

На основании численных расчетов построены графики, приведенные на рис. 2, 3.

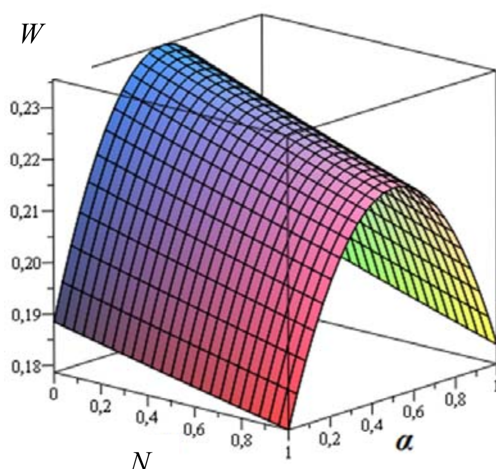


Рис. 2. Зависимость несущей способности от параметра α, характеризующего зависимость вязкости от давления и параметра N, характеризующего проницаемость пористого слоя

Fig. 2. Bearing resistance – parameter α relation characterizing the viscosity – pressure and parameter N relation, characterizing porous layer permeability

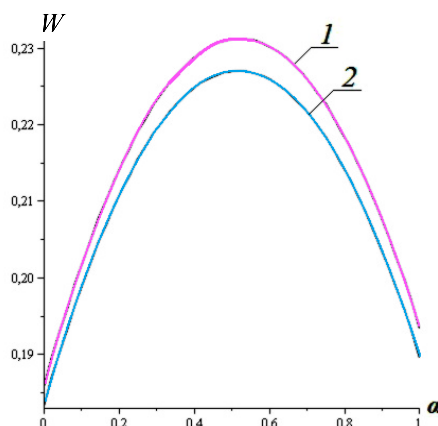


Рис. 3. Зависимость несущей способности от параметра α, характеризующего зависимость вязкости от давления: 1 — N = 0,25; 2 — N = 0,5

Fig. 3. Bearing resistance – parameter α relation characterizing the viscosity – pressure relation: 1 — N = 0,25; 2 — N = 0,5

Выводы:

1. С увеличением параметра α, характеризующего зависимость вязкости от давления, несущая способность подшипника имеет экстремум, что приводит в этой области к снижению силы трения.

2. С увеличением параметра *N*, характеризующего проницаемость пористого слоя, несущая способность и сила трения резко уменьшаются.

Библиографический список

1. Ахвердиев, К. С. Гидродинамический расчет подшипников скольжения с учетом сил инерции смазочной жидкости, обладающей вязкоупругими свойствами / К. С. Ахвердиев, М. В. Яковлев, И. А. Журба // Трение и износ. — 2003. — Т. 24, № 2. — С. 121–125.

2. Ахвердиев, К. С. Гидродинамический расчет подшипников скольжения с использованием моделей слоистого течения вязкой и вязкопластичной смазки / К. С. Ахвердиев, П. А. Воронцов, Т. С. Черкасова // Трение и износ. — 1998. — Т.16, № 6. — С. 698–707.

3. Ахвердиев, К. С. Гидродинамический расчет упорного подшипника с вязкоупругой смазкой с учетом зависимости вязкости и модуля сдвига от температуры и определение условий устойчивости его работы / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, А. В. Мулин, // Вестник РГУПС. — 2008. — № 3. — С. 118–128.

4. Ахвердиев, К. С. Расчетная модель упорного подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на неньютоновских смазочных материалах с адаптированной опорной поверхностью [электронный ресурс] / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, Е. О. Лагунова, К. С. Солоп // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 4. — Режим доступа : http://www.ivdon.ru/magazine/ (дата обращения 24.04.2017).

5. Безо, Р. Определение зависимости вязкоупругих параметров 5Р4Е от давления и температуры методом светорассеяния / Р. Безо, С. Хесе-Безо, Г. Далмаз, Р. Верн // Проблемы трения и смазки. — 1986. — № 4. — С. 60–69.

6. Дроздов, Ю. Н. Трение и износ в экстремальных условиях : справ. / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В. Н. Пучков. — Москва : Машиностроение, 1986. — 224 с.

7. Задорожная, Е. А. Методика расчета сложнонагруженных узлов трения, смазываемых неньютоновскими жидкостями / Е. А. Задорожная, И. В. Мухортов, И. Г. Леванов // XV Международный конгресс двигателестроителей. — Харьков : ХАИ, 2010. — С. 40–41.

8. Задорожная, Е. А. Оценка теплового состояния сложнонагруженного подшипника с учетом реологических свойств смазочного материала / Е. А. Задорожная, В. Г. Караваев // Двигатели внутреннего сгорания. Всеукраинский научно-исследовательский журнал. — Харьков : Изд-во Харьковского политехнического института, 2012. — № 2. — С. 66–73.

9. Задорожная, Е. А. Применение неньютоновских моделей смазочных жидкостей при расчете сложнонагруженных узлов трения поршневых и роторных машин / Е. А. Задорожная, И. В. Мухортов, И. Г. Леванов // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2011. — № 7. — С. 22–30.

10. Захаров, С. М. Гидродинамическая теория смазки / С. М. Захаров // Современная трибология. Итоги и перспективы; под ред. К. В. Фролова. — Москва : Изд-во ЛКИ, 2008. — С. 95–157.

11. Мукутадзе, М. А. Гидродинамический расчет упорного подшипника с адаптированным профилем опорной поверхности, работающего на сжимаемой вязкоупругой смазке / М. А. Мукутадзе // Трение и смазка в машинах и механизмах. — Москва : Машиностроение, 2012. — С. 19–23.

References

1. Akhverdiev, K.S., Yakovlev, M.V., Zhurba, I.A. Gidrodinamicheskiy raschet podshipnikov skol'zheniya s uchetom sil inertsii smazochnoy zhidkosti, obladayushchey vyazkouprugimi svoystvami. [Hydrodynamic design of sliding bearings with the account of inertia of the lubricating fluid with viscoelastic properties.] Friction and Wear, 2003, vol. 24, no. 2, pp. 121–125 (in Russian).

2. Akhverdiev, K.S., Vorontsov, P.A., Cherkasova, T.S. Gidrodinamicheskiy raschet podshipnikov skol'zheniya s ispol'zovaniem modeley sloistogo techeniya vyazkoy i vyazkoplastichnoy smazki. [Hydrodynamic analysis of plain bearings with the use of models with stratified flow of viscous and viscoplastic lubricant.] Friction and Wear, 1998, vol. 16, no. 6, pp. 698–707 (in Russian).

3. Akhverdiev, K.S., Mukutadze, M.A., Mulin, A.V. Gidrodinamicheskiy raschet upornogo podshipnika s vyazkouprugoy smazkoy s uchetom zavisimosti vyazkosti i modulya sdviga ot temperatury i opredelenie usloviy ustoychivosti ego raboty. [The hydrodynamic calculation of thrust bearing with viscoelastic lubricant taking into account the dependence of viscosity and shift modulus on the temperature and the determination the stability conditions of its operation.] Vestnik RGUPS, 2008, no. 3pp. 118–128 (in Russian).

4. Akhverdiev, K.S., Mukutadze, M.A., Lagunova, E.O., Solop, K.S. Raschetnaya model' upornogo podshipnika skol'zheniya s povyshennoy nesushchey sposobnost'yu, rabotayushchego na nen'yutonovskikh smazochnykh materialakh s

adaptirovannoy opornoy poverkhnost'yu. [Design model of thrust sliding bearing with increased bearing capacity operating on non-Newtonian lubricants with adapted seating.] Engineering Journal of Don, 2013, no. 4. Available at: http://www.ivdon.ru/magazine/ (accessed: 24.04.2017) (in Russian).

5. Bezo, R., Hese-Bezo, S., Dalmaz, G., Wern, R. Opredelenie zavisimosti vyazkouprugikh parametrov 5R4E ot davleniya i temperatury metodom svetorasseyaniya. [Determination of dependence of viscoelastic parameters of SP4E on pressure and temperature by light scattering method.] Problemy treniya i smazki, 1986, no. 4, pp. 60–69 (in Russian).

6. Drozdov, Y.N., Pavlov, V.G., Puchkov, V.N. Trenie i iznos v ekstremal'nykh usloviyakh. [Friction and wear under extreme conditions] Moscow: Mashinostroenie, 1986, 224 p. (in Russian).

7. Zadorozhnaya, E.A., Mukhortov, I.V., Levanov, I.G. Metodika rascheta slozhnonagruzhennykh uzlov treniya, smazyvaemykh nen'yutonovskimi zhidkostyami. [Design procedure for complex-loaded friction units lubricated by non-Newtonian liquids.] XV Int. Congress of Engine Manufacturers. Kharkov: KhAI, 2010, pp. 40–41 (in Russian).

8. Zadorozhnaya, E.A., Karavaev, V.G. Otsenka teplovogo sostoyaniya slozhnonagruzhennogo podshipnika s uchetom reologicheskikh svoystv smazochnogo materiala. [Estimation of thermal state of complex-loaded bearing with account of rheological properties of lubricant.] Internal Combustion Engines, 2012, no.2, pp. 66–73 (in Russian).

9. Zadorozhnaya, E.A., Mukhortov, I.V., Levanov, I.G. Primenenie nen'yutonovskikh modeley smazochnykh zhidkostey pri raschete slozhnonagruzhennykh uzlov treniya porshnevykh i rotornykh mashin. [Application non-Newtonian models of lubricant fluids at calculation complex-loaded units of friction piston and rotor-type machines.] Friction & Lubrication in Machines and Mechanisms, 2011, no. 7, pp. 22–30 (in Russian).

10. Zakharov, S.M. Gidrodinamicheskaya teoriya smazki. [Hydrodynamic theory of lubrication.] Sovremennaya tribologiya. Itogi i perspektivy. [Modern tribology. Results and prospects.] Frolov, K.V., ed. Moscow: Izd-vo LKI, 2008, pp. 95–157 (in Russian).

11. Mukutadze, M.A. Gidrodinamicheskiy raschet upornogo podshipnika s adaptirovannym profilem opornoy poverkhnosti, rabotayushchego na szhimaemoy vyazkouprugoy smazke. [Hydrodynamic analysis of thrust bearing with adapted seating contour operating on compressible viscoelastic lubricant.] Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms. Moscow: Mashinostroenie, 2012, pp. 19–23 (in Russian).

Поступила в редакцию 07.07.2017
Сдана в редакцию 07.07.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 07.07.2017
Submitted 07.07.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Савенкова Мария Андреевна,
доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), кандидат химических наук, доцент,
vm@rgups.ru

Солоп Константин Сергеевич,
аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6443-0294
k1212-kostya@yandex.ru

Authors:

Savenkova, Maria A.,
associate professor of the Production Automation Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2,), Cand.Sci. (Chem.), associate professor,
vm@rgups.ru

Solop, Konstantin S.,
postgraduate student of the Production Automation Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2,),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6443-0294
k1212-kostya@yandex.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.315.3: 621.316.99 10.23947/1992-5980-2017-17-3-117-127

Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов*

М. Н. Дубяго[1], Н. К. Полуянович[2], В. Х. Пшихопов[3]**
[1, 2, 3] Южный федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация

Method of investigating thermal fluctuation processes in problems of diagnostics and prediction of insulating materials***

M. N. Dubyago[1], N. K. Poluyanovich[2], V. Kh. Pshikhopov[3]**
[1, 2, 3] Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation

Введение. Статья посвящена исследованиям термофлуктуационных процессов в изоляционных материалах в соответствии с теорией теплопроводности для решения задач диагностики и прогнозирования остаточного ресурса изоляционных материалов на основе цифрового регистратора, а также неразрушающего температурного метода.

Целью работы является совершенствование методов неразрушающей диагностики, а именно — разработка автоматизированной системы контроля состояния изоляции и расчетно-экспериментальное исследование.

Материалы и методы. Предложены математические модели, описывающие послойное распределение температуры кабельной линии в соответствии с теорией теплопроводности, использующие дифференциальное уравнение Фурье. Создан обобщенный алгоритм работы регистратора контроля параметров силовых кабельных линий (СКЛ), реализующий метод неразрушающего контроля термофлуктуационных процессов в изоляционных материалах СКЛ. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температуры. При этом исследовались различные нагрузочные режимы работы и функции изменения тока кабеля.

Результаты исследования. Разработаны математические модели и программное обеспечение для численного моделирования температурного поля в сечении кабеля в соответствии с теорией теплопроводности, учитывающие физические свойства материалов и геометрические размеры элементов кабеля. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температуры. Научно подтверждена адекватность разработанной упрощенной математической модели определения температуры наиболее нагретой точки изоляции жилы кабеля на основе измеренных значений температуры поверхности силового кабеля и температуры воздуха при различных изменениях действующего значения тока кабеля. Разработан и обоснован метод исследо-

Introduction. The investigation of thermal fluctuation processes in insulating materials in accordance with the thermal conductivity theory for solving the problems on diagnostics and forecasting the residual life of insulating materials on the basis of a digital recorder, as well as on the nondestructive temperature method, is described. The work objective is to improve the nondestructive diagnostics methods, namely, the development of an automated control system for the state of insulation, and a computational and experimental study.

Materials and Methods. Mathematical models that describe the layer-by-layer temperature distribution of the cable line in accordance with the theory of thermal conductivity using Fourier differential equation are proposed. A generalized algorithm for the operation of the PCL parameters monitoring recorder is created. It implements the technique of nondestructive testing of thermal fluctuation processes in PCL insulation materials. A comparative analysis of the experimental and calculated characteristics of the temperature distributions is carried out. At that, different charging modes of operation and functions of the cable current variation are investigated.

Research Results. Mathematical models and software for numerical simulation of the temperature field in the cable cross-section in accordance with the theory of thermal conductivity are developed. Physical properties of materials and the geometric dimensions of cable elements are considered. A comparative analysis of the experimental and calculated characteristics of the temperature distributions is made. The developed simplified mathematical model for determining the temperature of the most heated point of the cable core insulation on the basis of the measured values of the surface temperature of the power cable and the air temperature for various changes in the effective value of the cable current is validated. A

* Работа выполнена по гранту ВнГр-07/2017-15.
** E-mail: w_m88@mail.ru, nik1-58@mail.ru, pshichop@rambler.ru
*** The research is done on ВнГр-07/2017-15 grant.

вания термофлуктуационных процессов на основе использования послойно расположенных в СКЛ температурных датчиков, позволяющий объединить в одном измерительном средстве два метода контроля: прогнозирование развивающегося дефекта изоляции и неразрушающий контроль термофлуктуационных процессов силового кабеля. Предложенная математическая модель может быть использована в качестве базовой при расчете тепловых процессов силовых кабелей в режиме реального времени, поскольку ее адекватность подтверждена экспериментальными исследованиями.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке теории, методов диагностики и прогнозирования состояния изоляционных материалов в сложных распределенных системах при различных режимах работы.

method for investigating thermal fluctuation processes based on the layered temperature sensors in PCL is developed and justified. That makes it possible to combine two control techniques – prediction of the growing insulation defect and nondestructive testing of the thermal fluctuation processes of a power cable – in one measuring tool. The suggested mathematical model can be used as a base for calculating the thermal processes of power cables in real time mode, as its adequacy is confirmed by the experimental studies.

Discussion and Conclusions. The obtained results can be used in the development of the theory, methods of diagnostics and prediction of the insulating materials state in complex distributed systems under various operating conditions.

Ключевые слова: термофлуктуационные процессы, диагностика, прогнозирование, изоляционные материалы.

Keywords: thermal fluctuation processes, diagnostics, forecasting, insulating materials.

Образец для цитирования: Дубяго, М. Н. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, В. Х. Пшихопов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 117–127.

For citation: M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich, V.Kh. Pshikhopov. Method of investigating thermal fluctuation processes in problems of diagnostics and prediction of insulating materials. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 117–127.

Введение. Увеличение перетока электроэнергии в энергосистемах приводит к тому, что СКЛ используют на пределе их физических возможностей, следствием чего является пробой электрической изоляции [1]. Таким образом, вопросы обеспечения энергетической безопасности, а также повышения эффективности передачи электроэнергии выходят на первый план.

Важной характеристикой СКЛ является нагрузочная способность, определяемая тепловым режимом. По ней рассчитывается площадь поперечного сечения и пропускная способность СКЛ [2]. Ресурс изоляционных материалов зависит от таких параметров, как температура, ток, влажность [3]. СКЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) обладает высокими термоизолирующими свойствами. Поэтому пропускная способность и надежность в значительной степени зависят от температурного режима работы. Для решения указанной проблемы используется мониторинг температуры кабеля во время работы. Для исследования температурного поля в сечении СКЛ используется цифровой регистратор (рис. 1).

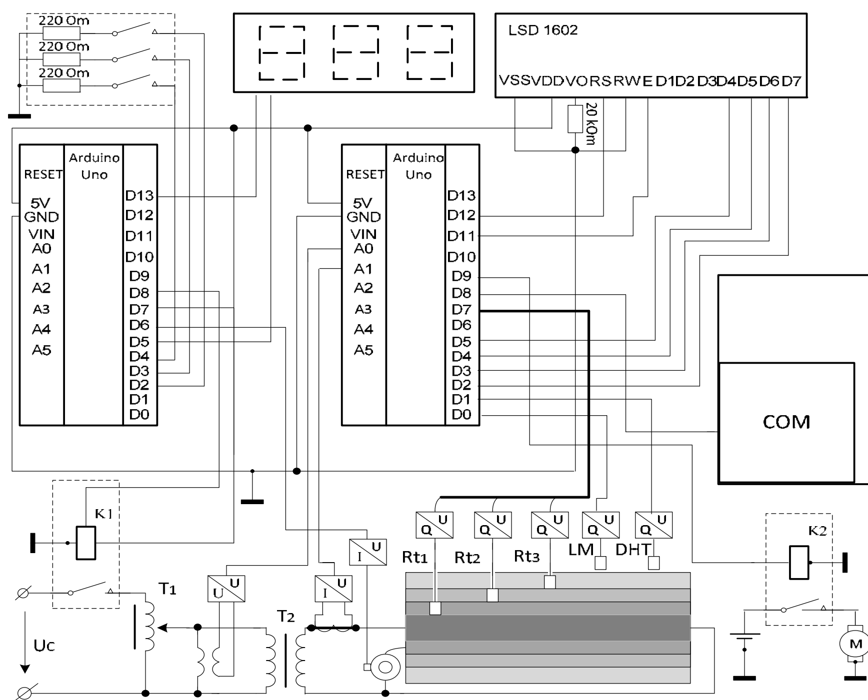


Рис. 1. Схема цифрового регистратора для проведения экспериментальных исследований

Fig. 1. Diagram of digital recorder for conducting experimental studies

Современные средства мониторинга распределенной по длине линии температуры не имеют подходящих для этого моделей и алгоритмов расчета тепловых процессов в изоляции кабеля [4].

Представленное исследование термофлуктуационных процессов основывается на методе регистрации температуры внутри изоляции. Распределенные оптоволоконные системы с установленными в пределах поперечного сечения СКЛ волоконнооптическими датчиками измеряют внутренние температуры для определения точек повышенного нагрева. Для исследования законов передачи температуры в лабораторных условиях решено применить послойное размещение датчиков (рис. 1).

При появлении частичного разряда (ЧР) в изоляционном материале рассеивается энергия, основная часть которой затрачивается на деструкцию изоляционного материала. Поэтому в месте действия ЧР осуществляется нагрев изоляции, что и является объектом измерения [5, 6]. Учитывая общие требования к системам измерения термофлуктуационных процессов и проблематику измерения, следует отметить, что существующие цифровые регистраторы не позволяют одновременно реализовать необходимый набор диагностических функций. Поэтому была использована система цифровой регистрации термофлуктуационных процессов, разработанная на кафедре электротехники и мехатроники (ЭиМ) Южного федерального университета (ЮФУ) [5].

Разработка алгоритма и системы мониторинга тепловых процессов СКЛ. Разработанная система измерения термофлуктуационных процессов сочетает в себе все достоинства современных цифровых измерительных систем, а именно:

— мониторинг тепловых процессов с помощью системы *SCADA* , реализованной в среде *LabVIEW*;

— мониторинг в режиме реального времени послойного измерения температуры;

— регулирование и измерение влажности и т. д. (рис. 1 [5]).

Исследование повышенного перегрева термофлуктуационным методом предусматривает использование в лабораторных экспериментах температурных датчиков, расположенных послойно в СКЛ (см. рис. 1), для создания моделей и алгоритмов расчета тепловых процессов в изоляции.

Таким образом, разработанная схема автоматизированной системы контроля состояния изоляции *SMaCTC*:

— позволяет независимо или совместно использовать два метода контроля (прогнозирования развивающегося дефекта изоляции и неразрушающего контроля термофлуктуационных процессов);

— имеет набор диагностических функций по контролю режимов работы СКЛ (номинальной нагрузки, холостого хода, короткого замыкания) по результатам полученного профиля температур, снятых датчиками [5, 6].

Алгоритм работы программного обеспечения цифрового регистратора контроля параметров СКЛ представлен на рис. 2.

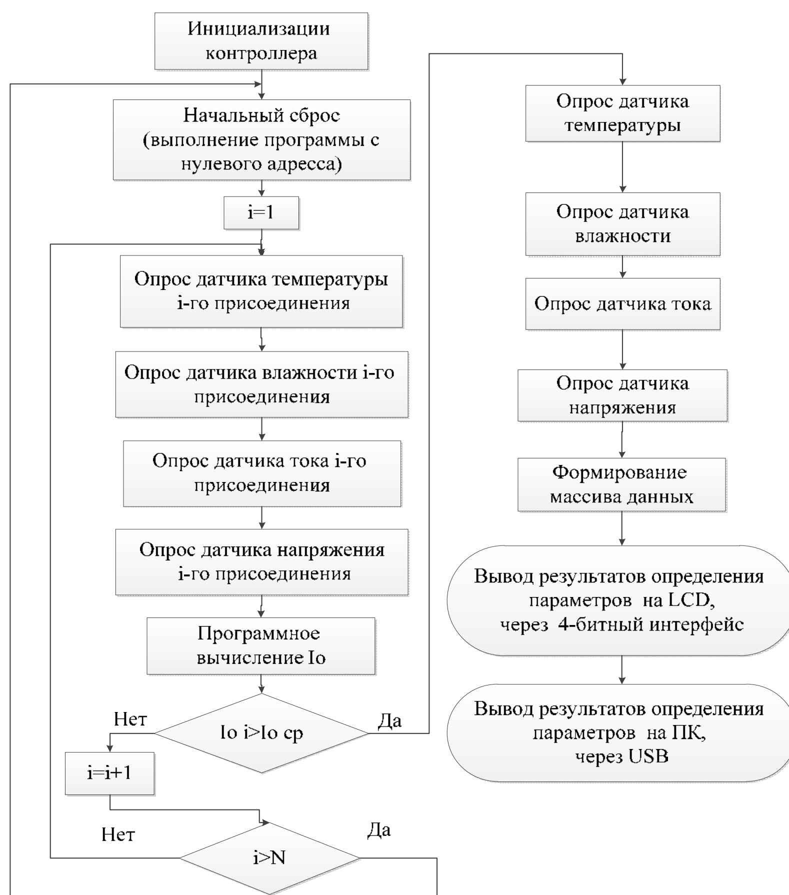


Рис. 2. Алгоритм функционирования регистратора контроля параметров СКЛ

Fig. 2. Algorithm of PCL parameters monitoring recorder operation

Таким образом, обобщенный алгоритм:
— во-первых, позволяет управлять процессом диагностики параметров СКЛ;
— во-вторых, эффективно реализует метод контроля термофлуктуационных процессов в изоляционных материалах СКЛ посредством цифрового регистратора.

Моделирование термопроцессов изоляции СКЛ с использованием пакета *LabVIEW*. Для исследования термофлуктуационных процессов в СКЛ создан виртуальный инструмент *LabVIEW*, который:
— позволяет взаимодействовать с измерительными датчиками и управляющей аппаратурой;
— осуществляет сбор, обработку, отображение информации и результатов расчета;
— моделирует как отдельные объекты, так и цифровую систему *SMaCTC* в целом.

Вид панели виртуального инструмента представлен на рис. 3.

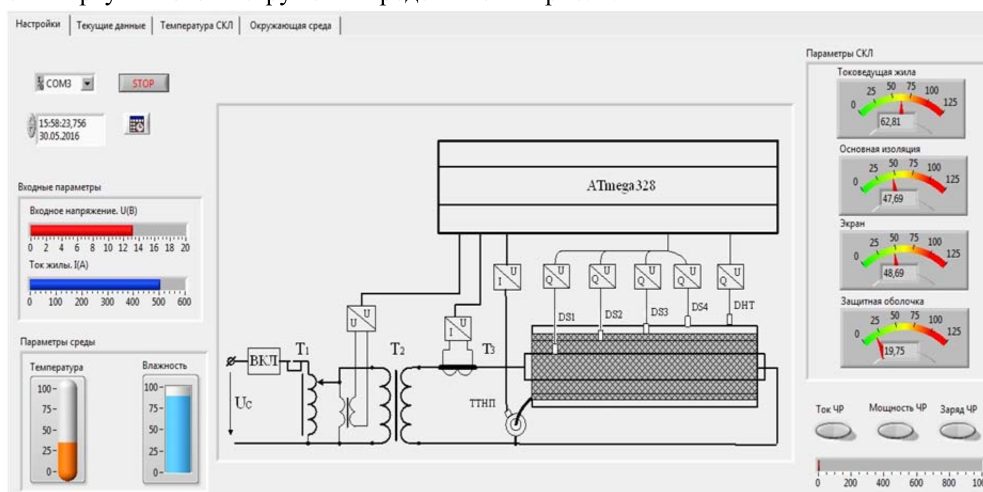


Рис. 3. Панель виртуального инструмента *LabVIEW*

Fig. 3. Virtual toolbar LabVIEW

Стенд для исследования термофлуктуационных процессов представляет собой компьютерную модель *LabVIEW* на рабочем столе персонального компьютера и содержит модели виртуального инструмента:
— данные и графики температур;
— данные и зависимости влажности;
— анализ и средние данные температур;
— временную зависимость тока [6].

Программное обеспечение позволяет рассчитывать значения тока, напряжения, температуры жилы кабеля, влажности, тока нулевой последовательности ($I_{ТНП}$) с интервалом времени 1 с.

Таким образом, создана автоматизированная система контроля характеристик изоляционных материалов *SMaCTC*, позволяющая контролировать термофлуктуационные процессы СКЛ напряжением 10 кВ. При этом используется метод неразрушающего контроля термофлуктуационных процессов в изоляционных материалах СКЛ. Специальное программное обеспечение снимает информацию о работе *SMaCTC*.

Мониторинг тепловых условий кабеля и окружающей среды. Для исследования тепловых режимов СКЛ использовались математические и имитационные модели силового кабеля с СПЭ [6, 7, 8, 9]. В этом случае кабель и окружающая среда разбиваются на зоны, представленные в виде электрической схемы замещения (рис. 4).

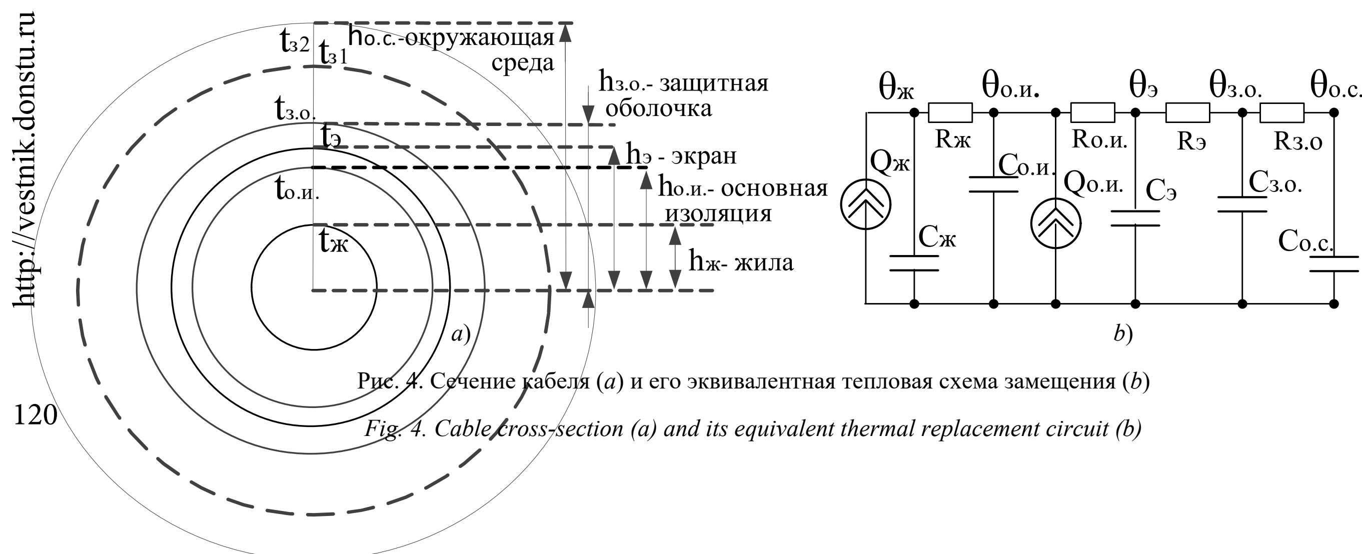


Рис. 4. Сечение кабеля (*a*) и его эквивалентная тепловая схема замещения (*b*)

Fig. 4. Cable cross-section (a) and its equivalent thermal replacement circuit (b)

Здесь $\theta_{ж}$, $\theta_{э}$, $\theta_{о.и.}$, $\theta_{з.о.}$, $\theta_{о.с.}$ — соответственно температуры на жиле, экране, основной изоляции, защитной оболочке, окружающей среде; $C_{ж}$, $C_{э}$, $C_{о.и.}$, $C_{з.о.}$, $C_{о.с.}$ — теплоемкости соответственно жилы, экрана, основной изоляции, защитной оболочки, окружающей среды; $R_{ж}$, $R_{э}$, $R_{о.и.}$, $R_{з.о.}$— тепловые сопротивления соответственно жилы, экрана, основной изоляции, защитной оболочки; $Q_{ж}$, $Q_{о.и}$— источники тока, замещающие температурный напор, создаваемый током, протекающим по жиле и экрану.

На рис. 4 показаны слои и точки, в которых проводится контроль тепловых параметров. Исследование распределения температуры кабельной линии выполнялось в соответствии с теорией теплопроводности, при этом использовалось дифференциальное уравнение Фурье [10].

Физические свойства материалов и геометрические размеры элементов кабеля АПвПу г-1х30/25-10 [5, 6] сведены в табл. 1 [11].

Таблица 1

Table 1

Параметры кабеля

Cable parameters

Материал / Параметр	Алюминий	СПЭ	Медь	Воздух
Удельная теплопроводность, Вт/(м·К)	209,3	0,38	400	0,024
Плотность, кг/м^3	2700	2200	8700	1,2
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	920	1900	385	1005

Профиль температур в сечении силового кабеля (рис. 4) определялся системой уравнений в соответствии с теорией теплопроводности.

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_{о.с}+\left(\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж}+\frac{I_э^2}{\gamma_э S_э}\right)/2\pi r\varkappa,\ (h=h_{о.с.})\\ \theta(h_{о.с.})+ln\left(\frac{r_{о.с.}}{h}\right)\left(\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж}+\frac{I_э^2}{\gamma_э S_э}\right)/2\pi\lambda_{о.с},\ (h_{з.о.}\le h\le h_{о.с.})\\ \theta(h_{з.о.})+ln\left(\frac{r_{з.о.}}{h}\right)\left(\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж}+\frac{I_э^2}{\gamma_э S_э}\right)/2\pi\lambda_{о.и.},\ (h_э\le h\le h_{з.о.})\\ \theta(h_э)+ln\left(\frac{h_э}{h}\right)\frac{\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж}-\frac{\delta_э^2}{\gamma_э}h_{о.и.}^2\pi}{2\pi\lambda_э}+\frac{I_э^2\left(h_э^2-h^2\right)}{4\lambda\gamma_э},\ (h_{о.и.}\le h\le h_э)\\ \theta(h_{о.и.})+ln\left(\frac{h_{о.и.}}{h}\right)\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж}/2\pi\lambda_{о.и.},\ (h_ж\le h\le h_{о.и.})\\ \theta(h_ж)+\delta_ж^2(h_ж^2-h^2)/4\lambda_ж\gamma_ж,\ (0\le h\le h_ж).\end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\lambda_{о.с.}, \lambda_{о.и.}, \lambda_{э}$, $\lambda_{ж}$, — удельные теплопроводности окружающей среды, полиэтилена, экрана и жилы соответственно; $I_ж, I_э$ — токи на жиле и экране; $\varkappa$ — коэффициент теплопроводности; $\delta_ж = I_ж/S_ж$; $\delta_э = I_э/S_э$; $S_ж, S_э$— площади поперечного сечения жилы и экрана; $\gamma_ж, \gamma_э$ — электропроводности жилы и экран.

В соответствии с системой уравнений (1) в *MatLab* строится профиль температур в сечении кабеля и окружающей среды [6, 12].

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температуры. Для доказательства адекватности предлагаемой упрощенной математической модели СКЛ авторы провели исследования, в ходе которых через кабель пропускался переменный ток, величина которого изменялась в зависимости от режима работы (рис. 5).

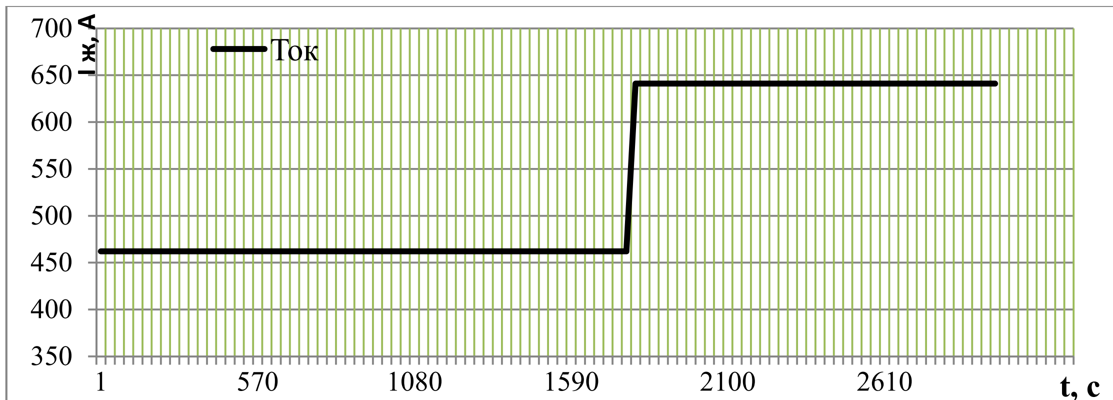


Рис. 5. Экспериментальная диаграмма тока в кабеле

Fig. 5. Experimental diagram of current in cable

В ряде работ [1, 6, 13] представлены модели, с помощью которых рассчитывается распределение температуры по слоям, а также зависимость, позволяющая определять температуру жилы ($\theta_ж$, °C).

Предлагается упрощенная аналитическая зависимость (2) определения температуры наиболее нагретой точки изоляции (жилы кабеля), полученная из системы (1). Температура жилы кабеля вычисляется с учетом температуры поверхности кабеля, окружающей среды и тока жилы:

$$\theta_ж(t) = \theta_{з.о.}(t) + \frac{n \cdot I^2 \cdot \rho_{20} \cdot m \cdot T_k \cdot K_\rho \left[1 + \alpha \cdot \left(\theta_{доп} - \theta_{о.с.}(t)\right)\right]}{S}. \quad (2)$$

В опытах использовался силовой кабель АПв Пу г-1х30/25-10.

Здесь $\boldsymbol{\theta}_ж$ — расчетная температура жилы кабеля, °C; $\boldsymbol{\theta}_{з.о.}$ = 23 °C — измеренная температура поверхности кабеля (защитная оболочка); $n = 1$ — число жил кабеля; I — максимальный ток кабеля при проведении измерений, А; $\rho_{20} = 2{,}8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м — удельное электрическое сопротивление жилы кабеля при 20 °C; $T_k = 0{,}0028$ °C, м/Вт — сумма термических сопротивлений изоляции и защитных покровов кабеля; m — экспериментальный множитель; $K_\rho = 1{,}02$ — поправочный коэффициент для приведения электрического сопротивления к расчетной температуре; $\alpha = 0{,}0043081$ °C — температурный коэффициент сопротивления материала жилы [7]; $\boldsymbol{\theta}_{доп}$ = 90 °C — длительно допустимая температура изоляции жилы; $\boldsymbol{\theta}_{о.с.}$ = 23 °C — измеренная температура окружающей среды; $S = 0{,}0038465$ — сечение жилы кабеля, м^2.

Итак,

$$\theta_ж(t) = \theta_{з.о.}(t) + \frac{1 \cdot I^2 \cdot 2{,}8 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}0028 \cdot 1{,}02\left[1 + 0{,}004308 \cdot \left(90 - \theta_{о.с.}(t)\right)\right]}{3{,}8465 \cdot 10^{-3}}.$$

Основное назначение уравнения (2) — рассчитать температуру жилы кабеля максимально просто. Уравнение учитывает лишь стационарные тепловые процессы в кабеле и справедливо при установившихся значениях измеряемых величин. Это характерно и для всех нормативных документов по расчету тепловых процессов в силовых кабелях: МЭК (1ЕС) 60287, ГОСТ Р МЭК 60287-1-1, ГОСТ Р МЭК 60287-1-2, ГОСТ Р МЭК 60287-1-3, ГОСТ Р МЭК 60287-2-1, ГОСТ Р МЭК 60287-2-2.

При эксплуатации вполне естественно, что измеряемые величины изменяются во времени, таким образом, для их учета необходимо вести расчет нестационарных тепловых процессов.

Эксперимент 1. Экспериментальная диаграмма ступенчатого изменения действующего значения тока кабеля приведена на рис. 5. Экспериментальные и расчетные временные зависимости процесса нагрева кабеля, выражение (2), построенные при ступенчатом изменении тока, приведены на рис. 6.

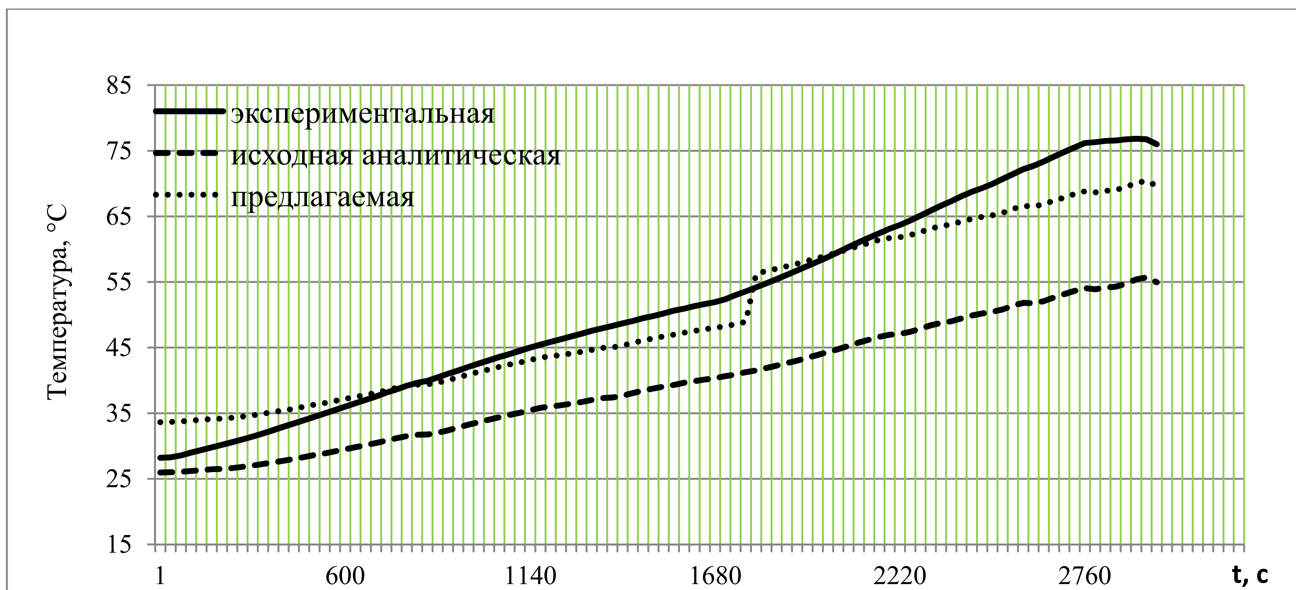


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные временные зависимости процесса нагрева кабеля

Fig.6. Experimental and calculated time dependences of cable heating process

В результате экспериментальных исследований получены показатели качества предложенной математической модели тепловых процессов силового кабеля:

— относительная погрешность модели не превышает 11 %;

— среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от расчетных по модели не превышает 4,5 °C.

Не учтено влияние теплообмена через торцы исследуемого кабеля в исходной модели. Во время проведения эксперимента торцы жилы не были закрыты теплоизолирующей тканью, и происходил теплообмен с держателями.

Из-за малой длины образца этот теплообмен оказал влияние на результат. Приведенные диаграммы демонстрируют корреляцию экспериментальных и расчетных кривых температуры, что говорит о верном выборе математической модели [2, 4].

Эксперимент 2. Для проверки адекватности разработанной математической модели на основе мощного понижающего трансформатора с выходным током до 640 А была создана измерительная система (рис. 1), позволяющая исследовать тепловые процессы в одножильных кабелях. Датчики температуры послойно размещались внутри и на поверхности СКЛ, а также на некотором удалении от него. Значение тока определялось посредством измерительного трансформатора. Все измерения проводились с помощью цифрового регистратора, подключенного к компьютеру. В качестве образца использовались отрезки заведомо исправных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена АПв Пу г-1х30/25-10 длиной 0,85 м. Экспериментальная диаграмма действующего значения тока приведена на рис. 7.

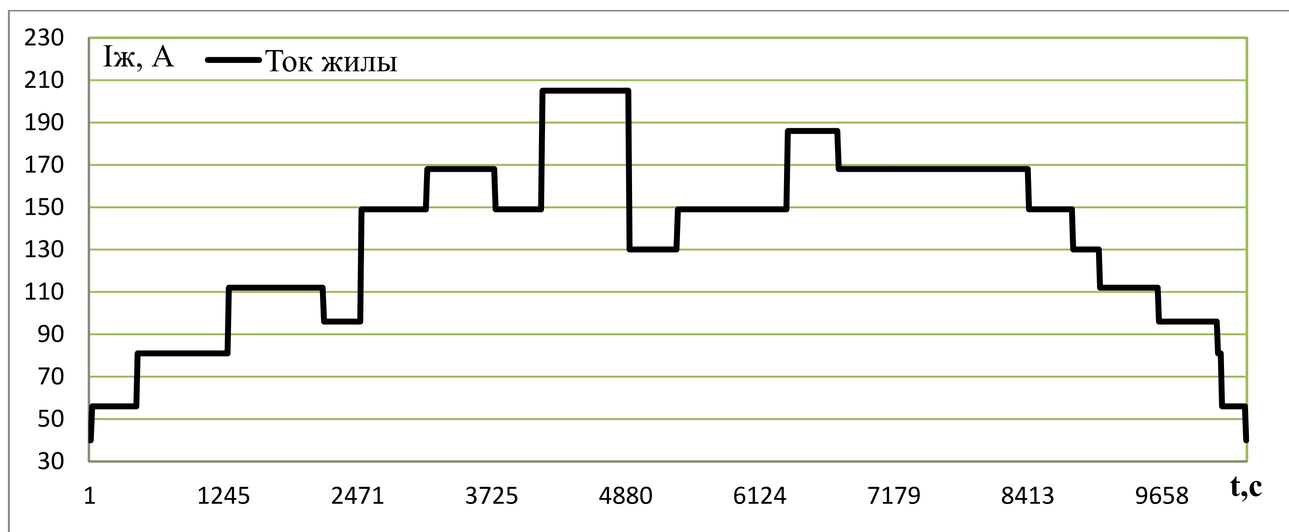


Рис. 7. Экспериментальная зависимость для действующего тока СКЛ

Fig. 7. Experimental dependence for PCL rms current

На рис. 8 приведены экспериментальные и расчетные временные диаграммы температуры кабеля АПв Пу г-1х30/25-10 по опыту, представленному в рис. 7.

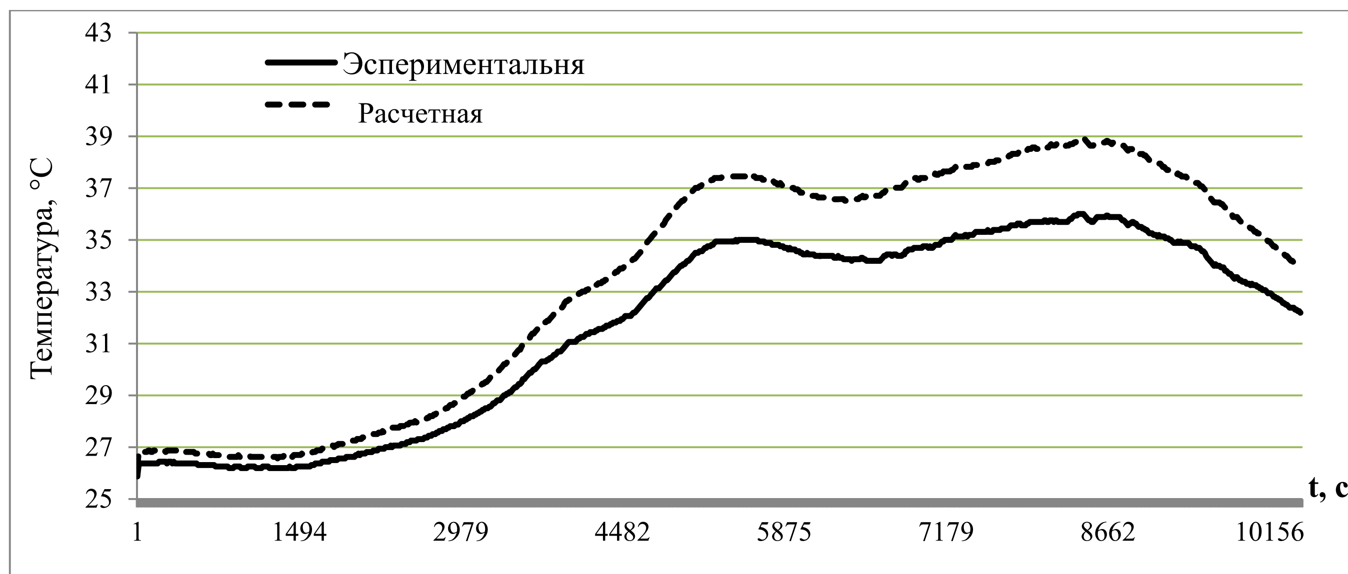


Рис.8. Временные диаграммы температуры на жиле кабеля АПв Пу г-1х30/25-10

Fig.8. Temperature time diagrams at cable core APv Pu g-1x30 / 25-10

Расчет показателей качества тепловой модели СКЛ. Введем показатели качества тепловой модели для анализа и оценки погрешностей расчета температуры по рассматриваемым тепловым моделям [14].

Пусть $(\Delta\theta)_j$ — абсолютная погрешность расчета температуры жилы на интервале расчета (или измерения) j. То есть

$$(\Delta\theta)_j = \left(\theta_{\text{р}}\right)_j - (\theta_{\text{э}})_j,$$

где j — номер интервала расчета.

В качестве показателя качества будем рассматривать величину

$$\Delta\theta_{\text{МАКС}} = max\left\{\left|(\Delta\theta)_j\right|\right\}.$$

Погрешность $\Delta\boldsymbol{\theta}_{\text{МАКС}}$ характеризует диапазон точности тепловой модели, то есть границы, в которых могут находиться значения величин $(\Delta\boldsymbol{\theta}_{\text{ж}})_{\boldsymbol{j}}$.

Рассмотрим также средние значения векторов $(\Delta\boldsymbol{\theta}_{\text{и}})_{\boldsymbol{j}}$ и $\left(\Delta\boldsymbol{\theta}_{\text{р}}\right)_{\boldsymbol{j}}$ как показатель качества тепловой модели:

$$\Delta\bar{\theta}_{\text{р}} = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left[\left(\Delta\theta_{\text{р}}\right)_j\right]}{n},$$

$$\Delta\bar{\theta}_{\text{э}} = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left[(\Delta\theta_{\text{э}})_{\text{j}}\right]}{n},$$

где n — количество интервалов на расчетном промежутке времени.

Величины $\Delta\bar{\boldsymbol{\theta}}_{\text{р}}$ и $\Delta\bar{\boldsymbol{\theta}}_{\text{э}}$ характеризуют ошибки расчета температуры жилы в статике, то есть по постоянной составляющей. Для анализа качества тепловой модели в динамике будем рассчитывать коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left[\left(\theta_{\text{р}}(j) - \bar{\theta}_{\text{р}}\right) - \left(\theta_{\text{э}}(j) - \bar{\theta}_{\text{э}}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left[\theta_{\text{р}}(j) - \bar{\theta}_{\text{р}}\right]^2 \cdot \sum_{j=1}^{n}[\theta_{\text{э}}(j) - \bar{\theta}_{\text{э}}]^2}},$$

где

$$\Delta\bar{\theta}_{\text{р}} = \frac{\sum_{j=1}^{n}\theta_{\text{р}}(j)}{n}, \Delta\bar{\theta}_{\text{э}} = \frac{\sum_{j=1}^{n}\theta_{\text{э}}(j)}{n}.$$

Обсуждение и заключения. Результаты расчета показателей качества математической модели по эксперименту 1, полученные путем сравнения измеренной и расчетной температуры кабеля, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Показатели качества тепловой модели при ступенчатом изменении тока

Thermal model quality parameters under stepwise current variation

Показатели точности расчета	Значения погрешности по формуле	
	стандартной	предлагаемой
Диапазон точности $\Delta\theta_{\text{МАКС}}$	22,419	7,657
Показатель качества (среднее значение векторов)	12,114	1,559
Коэффициент корреляции	0,822	0,988
Максимальная относительная погрешность, %	29	10
Среднеквадратическое отклонение	14,96	12,29

Полученные высокие значения коэффициента корреляции свидетельствуют о соответствии математической модели реальным тепловым процессам. Максимальная абсолютная погрешность при сравнении экспериментальных данных и расчетов по исходной формуле (рис. 6) составила 22,4 °С. Максимальная абсолютная погрешность при сравнении экспериментальных данных и расчетов по предлагаемой формуле (рис. 6) составила 7,6 °С.

Результаты расчета показателей качества математической модели по эксперименту 2, полученные путем сравнения измеренной и расчетной температуры кабеля, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Значения показателей качества тепловой модели

Thermal model quality parameters values

№ пп.	Показатели точности расчета	Погрешность по результатам расчета
1	Диапазон точности $\Delta\theta_{\text{МАКС}}$	2,9
2	Среднее значение векторов	1,8
3	Коэффициент корреляции	0,999
4	Максимальная относительная погрешность, %	5,4

Максимальная абсолютная погрешность расчета температуры по отношению к непосредственно измеренной температуре не превысила 2,9 °С. Высокие значения коэффициента корреляции свидетельствуют о соответствии математической модели реальным тепловым процессам.

Предложенная аналитическая зависимость может применяться в качестве базовой при вычислении тепловых процессов СКЛ в режиме реального времени, так как ее адекватность подкреплена опытными данными.

Выводы. Исследования показали, что разработанные расчетные соотношения даже в условиях принятых упрощений достаточно корректно описывают тепловые процессы в кабеле. Применение рассмотренных устройств повысит эксплуатационную надежность систем электроснабжения. Основная область применения разработанной математической модели — диагностика и прогнозирование ресурса изоляции силового кабеля. Цифровое аппаратное устройство способно измерять температуры поверхности кабеля и окружающей среды, а затем в режиме реального времени рассчитывать внутренние температуры и решать задачи раннего выявления повреждений.

Работа выполнена по гранту № ВнГр-07/2017-15 «Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии».

Библиографический список

1. Макаров, Е. Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / Е. Ф. Макаров. — Москва : Папирус ПРО, 2004. — Т. 3. — 674 с.

2. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки и расчет потерь. Общие положения / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2009. — 28 с.

3. Ларина, Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии : учеб. для вузов / Э. Т. Ларина. — Москва : Энергоатомиздат, 1996. — 464 с.

4. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени / В. В. Беляков [и др.] // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2008. — № 5. — С. 38–40.

5. Дубяго, М. Н. Мониторинг температуры силовых кабельных линий на ARDUINO / М. Н. Дубяго, В. С. Доценко, В. И. Данильченко // Сборник научных статей. Выпуск IX. — Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2015. — С. 134–139.

6. Dubyago, M. N. Prediction deterioration of insulation process on the basis of partial discharge thermal fluctuation theory / M. N. Dubyago, N. K. Poluyanovich, D. V. Burkov // ICAEMM 2016 : International Conference on Applied Engineering, Materials and Mechanics. — Weihai, 2016. — P. 205-211.

7. Математическое моделирование тепловых процессов в силовых кабелях с пластмассовой изоляцией / Д. И. Зализный [и др.] // Вестник Гомельского гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. — 2009. — № 3. — С. 65–75.

8. Навалихина, Е. Ю. Математическое моделирование процессов сложного тепломассопереноса в кабельном канале : дис. … канд. техн. наук / Е. Ю. Навалихина. — Пермь, 2015. — 109 с.

9. Sedaghat, A. Thermal Analysis of Power Cables in Free Air: Evaluation and Improvement of the IEC Standard Ampacity Calculations / A. Sedaghat, F. De León // IEEE Transactions on power delivery. — 2014. — Vol. 29, № 5. — P. 2306–2314.

10. Моделирование тепловых процессов в кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена средствами Matlab и Simulink / Е. С. Зайцев [и др.] // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB : Мат-лы V междунар. науч. конф. — Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. — С. 615–622.

11. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы : учеб. для вузов / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1985. — 304 с.

12. Dubyago, M. N. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration / M. N. Dubyago, N. K. Poluyanovich // AEECE 2015 : International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering. — Changsha : Atlantis Press, 2015. — P. 49–54.

13. Дубяго, М. Н. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, В. Х. Пшихопов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2015. — № 7 (168). — С. 230–237.

14. Pivnev, V. V. Some the application of the Taylor series for the analysis of processes in non-linear resistive circuits / V. V. Pivnev, S. N. Basan // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vol. 701/702. — P. 1173–1176.

References

1. Makarov, E.F. Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4–35 kV i 110–1150 kV. [Reference book on electrical networks 0.4-35 kV and 110-1150 kV.] Moscow: Papirus PRO, 2004, vol. 3, 674 p. (in Rusian).

2. GOST R MEK 60287-1-1. Kabeli elektricheskie. Raschet nominal'noy tokovoy na-gruzki. Chast' 1-1. Uravneniya dlya rascheta nominal'noy tokovoy nagruzki i raschet poter'. Obshchie polozheniya. [GOST R MEK 60287-1-1. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses. General.] Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Moscow: Standartinform, 2009, 28 p. (in Rusian).

3. Larina, E.T. Silovye kabeli i vysokovol'tnye kabel'nye linii. [Power cables and high-voltage cable lines.]. Moscow: Energoatomizdat, 1996, 464 p. (in Rusian).

4. Belyakov, V.V., et al. Monitoring silovykh kabel'nykh liniy s adaptatsiey k usloviyam okruzhayushchey sredy v rezhime real'nogo vremeni. [Monitoring of power cable lines with adaptation to environmental conditions in real-time mode.] ELEKTRO. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. 2008, no. 5, pp. 38–40 (in Rusian).

5. Dubyago, M.N., Dotsenko, V.S., Danilchenko, V.I. Monitoring temperatury silovykh kabel'nykh liniy na ARDUINO. [Monitoring of power cable lines temperature on ARDUINO.] Coll.of sci.papers. Iss.IX. Rostov-on-Don: SFU Publ. Centre, 2015, pp. 134–139 (in Rusian).

6. Dubyago, M.N., Poluyanovich, N. K., Burkov, D.V. Prediction deterioration of insulation process on the basis of partial discharge thermal fluctuation theory. ICAEMM 2016: International Conference on Applied Engineering, Materials and Mechanics. Weihai, 2016, pp. 205-211.

7. Zalizny, D.I., et al. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh protsessov v silovykh kabelyakh s plastmassovoy izolyatsiey. [Mathematical modeling of thermal processes in power cables with plastic insulation.] Vestnik of GSTU after P.O.Sukhoy, 2009, no. 3, pp. 65–75 (in Rusian).

8. Navalikhina, E.Y. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh protsessov v silovykh kabelyakh s plastmassovoy izolyatsiey. [Mathematical modeling of processes of complex heat and mass transfer in the cable channel: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Perm, 2015, 109 p. (in Rusian).

9. Sedaghat, A., De León, F. Thermal Analysis of Power Cables in Free Air: Evaluation and Improvement of the IEC Standard Ampacity Calculations. IEEE Transactions on power delivery, 2014, vol. 29, no. 5, pp. 2306–2314.

10. Zaitsev, E.S., et al. Modelirovanie teplovykh protsessov v kabele s izolyatsiey iz sshitogo polietilena sredstvami Matlab i Simulink. [Modeling of thermal processes in cable with XLPE insulation by means of Matlab and Simulink.] Proektirovanie inzhenernykh i nauchnykh prilozheniy v srede MATLAB : Mat-ly V mezhdunar. nauch. konf. [Designing of engineering and scientific applications in MATLAB environment: Proc. V Int. Sci. Conf.] Kharkov: NTU «KhPI », 2011, pp. 615–622 (in Rusian).

11. Bogoroditskiy, N.P., Pasynkov, V.V., Tareev, B.M. Elektrotekhnicheskie materialy. [Electrotechnical materials.] Leningrad: Energoatomizdat, 1985, 304 p. (in Rusian).

12. Dubyago, M.N., Poluyanovich, N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. AEECE 2015: International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering. Changsha: Atlantis Press, 2015, pp. 49–54.

13. Dubyago, M.N., Poluyanovich, N.K., Pshilhopov, V.Kh. Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh lini.y [Assessment and forecasting the insulation of power cable lines.] Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2015, no. 7 (168), pp. 230–237 (in Rusian).

14. Pivnev, V.V., Basan, S.N. Some the application of the Taylor series for the analysis of processes in non-linear resistive circuits. Applied Mechanics and Materials, 2015, vol. 701/702, pp. 1173–1176.

Поступила в редакцию 15.08.2017
Сдана в редакцию 15.08.2017
Запланирована в номер 25.08.2017

Received 15.08.2017
Submitted 15.08.2017
Scheduled in the issue 25.08.2017

Об авторах:

Дубяго Марина Николаевна,
ассистент Научно-исследовательского института робототехники и процессов управления Южного федерального университета (РФ, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, ЮФУ, ИНЭП),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0582-2340
w_m88@mail.ru

Authors:

Dubyago, Marina N.,
teaching assistant of the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Southern Federal University (RF,347922 Taganrog, ul. Shevchenko, 2),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0582-2340
w_m88@mail.ru

Полуянович Николай Константинович,
доцент кафедры «Электротехники и мехатроники», Научно-исследовательского института робототехники и процессов управления Южного федерального университета (РФ, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, ЮФУ, ИНЭП), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5941-1355
nik1-58@mail.ru

Пшихопов Вячеслав Хасанович,
директор Научно-исследовательского института робототехники и процессов управления Южного федерального университета (РФ, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, ЮФУ, ИНЭП), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-2772
vhpshichop@sfedu.ru

Poluyanovich, Nikolay K.,
associate professor of the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Southern Federal University (RF,347922 Taganrog, ul. Shevchenko, 2), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5941-1355
nik1-58@mail.ru

Pshikhopov, Vyacheslav Kh.,
director of the Research and Development Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University (RF,347922 Taganrog, ul. Shevchenko, 2), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-2772
vhpshichop@sfedu.ru

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 616-07 10.23947/1992-5980-2017-17-3-128-136

Анализ ЭЭГ испытуемых с дисциркуляторной энцефалопатией методом многомерного шкалирования по когнитивным тестам и по отведениям*

А. И. Новикова[1], К. А. Мороз[2], Е. А. Кижеватова[3]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[3] Ростовский государственный медицинский университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

EEG analysis of trial subjects with discirculatory encephalopathy by multidimensional scaling method of cognitive tests and leads***

A. I. Novikova[1], K. A. Moroz[2], E. A. Kizhevatova[3]**
[1.2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[3] Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена анализу ЭЭГ-данных больных с дисциркуляторной энцефалопатией и здоровых испытуемых методом многомерного шкалирования. Объектом исследования являлись графики динамики расположения векторов в двумерном признаковом пространстве ЭЭГ-данных здоровых и больных испытуемых, соответствующих каждому из отведений и когнитивных тестов. Цель состояла в проверке возможности использования метода многомерного шкалирования в анализе ЭЭГ для классификации испытуемых на больных и здоровых. Задачи работы: съем ЭЭГ у испытуемых при одновременном тестировании на когнитивные нарушения; многомерное шкалирование корреляционных матриц в системе STATISTICA и визуальный анализ полученных графиков.
Материалы и методы. Исследованы возможности многомерного метода статистической обработки экспериментальных данных — многомерного шкалирования — программного пакета STATISTICA. Обрабатываемые данные получены в результате записи ЭЭГ здоровых испытуемых и пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией электроэнцефалографом «Энцефалан-131-03» от 16 монополярных отведений. Съем ЭЭГ осуществлялся при одновременном тестировании испытуемых по когнитивным тестам.
Результаты исследования. Визуальный анализ графиков многомерного шкалирования здоровых испытуемых показал, что распределение попарных координат, соответствующих тестам (отведениям), для каждого из отведений (теста) характеризуется, в большинстве случаев, близким расположением координат относительно друг друга, в некоторых случаях — совпадением. У пациентов, больных дисциркуляторной энцефалопатией, для двумерных плоскостей многомерного шкалирования характерно более хаотичное распределение пространственных координат каждого из отведений или теста.
Обсуждение и заключения. Подтверждена эффективность применения многомерного шкалирования в качестве классификатора испытуемых по ЭЭГ-показателям. Авторами выдвинуто предположение о возможности использования многомерного шкалирования как дополнительного метода в диагностике дисциркуляторной энцефалопатии.

Introduction. The EEG-data of patients with discirculatory encephalopathy and healthy subjects by the multidimensional scaling method are analyzed. The research subject is graphs of the vectors arrangement dynamics in the two-dimensional attribute space of EEG-data of healthy and patient subjects corresponding to each of the leads and cognitive tests. The aim was to test feasibility of the multidimensional scaling method in the EEG analysis for the classification of trial subjects for patients and healthy persons. The study objectives are the following: EEG taking in trial subjects with simultaneous testing for cognitive deteriorations; multidimensional scaling of correlation matrices in the STATISTICA system, and visual analysis of the obtained graphs.
Materials and Methods. Capabilities of the multivariable technique of statistical analysis of test data – multidimensional scaling – the STATISTICA software package – are investigated. The processed data are obtained as a result of recording EEG of healthy subjects and patients with discirculatory encephalopathy using “Encephalan-131-03” electroencephalograph from 16 unipolar leads. The EEG is taken by simultaneous testing of the trial subjects by cognitive tests.
Research Results. Visual analysis of the multidimensional scaling diagrams of healthy subjects has shown that the distribution of the pairwise coordinates corresponding to the tests (leads), for each of the leads (test) is characterized, generally, by a close location of the coordinates relative to each other, and in some cases – by coincidence. In patients with discirculatory encephalopathy, two-dimensional planes of the multivariate scaling are characterized by a more chaotic distribution of the spatial coordinates of each of the leads or test.
Discussion and Conclusions. The efficiency effect of the multidimensional scaling as a classifier of trial subjects’ EEG is confirmed. The possibility of using the multidimensional scaling as an additional method in the diagnosis of discirculatory encephalopathy is proposed.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: novikova.anna16@yandex.ru, leramoroz@mail.ru, alyonatim@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Ключевые слова: электроэнцефалография, электроэнцефалограмма, биоэлектрическая активность головного мозга, дисциркуляторная энцефалопатия, когнитивные нарушения, многомерное шкалирование, когнитивные тесты.

Keywords: electroencephalography, electroencephalogram, brain bioelectrical activity, discirculatory encephalopathy, cognitive deteriorations, multidimensional scaling, cognitive tests.

Образец для цитирования: Новикова, А. И. Анализ ЭЭГ испытуемых с дисциркуляторной энцефалопатией методом многомерного шкалирования по когнитивным тестам и по отведениям / А. И. Новикова, К. А. Мороз, Е. А. Кижеватова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 128–136.

For citation: A. I. Novikova, K. A. Moroz, E. A. Kizhevatova. EEG analysis of trial subjects with discirculatory encephalopathy by multidimensional scaling method of cognitive tests and leads. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 128–136.

Введение. В представленном в статье исследовании ЭЭГ-данных испытуемых с дисциркуляторной энцефалопатией (ДЭП) — болезнью, вызванной недостаточным кровоснабжением сосудов головного мозга, был использован метод многомерного шкалирования (МШ). Это метод анализа данных о попарных отношениях между ними с целью представления в виде точек на пространстве признаков, размерность которого значительно меньше размерности исходного [1]. В отличие от ранее разработанных методов анализа многомерных наблюдений, таких как факторный анализ и кластерный анализ, модель МШ используется в статистической обработке данных значительно реже [2,3]. Однако данный метод имеет ряд преимуществ, к примеру:

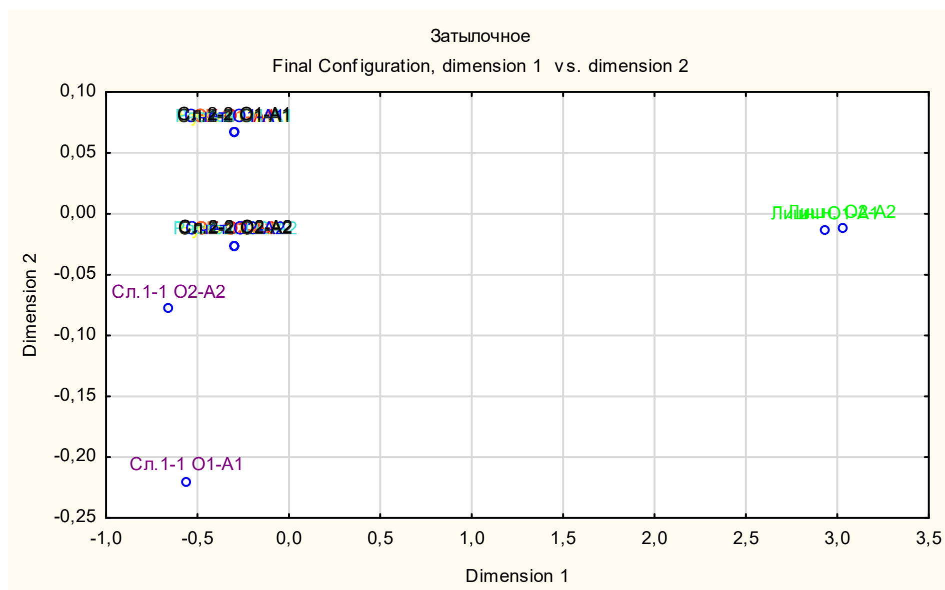
– отсутствие необходимости проверки исходных данных на нормальность распределения;

– возможность проведения анализа при сравнительно малом объеме выборочной совокупности [4,5].

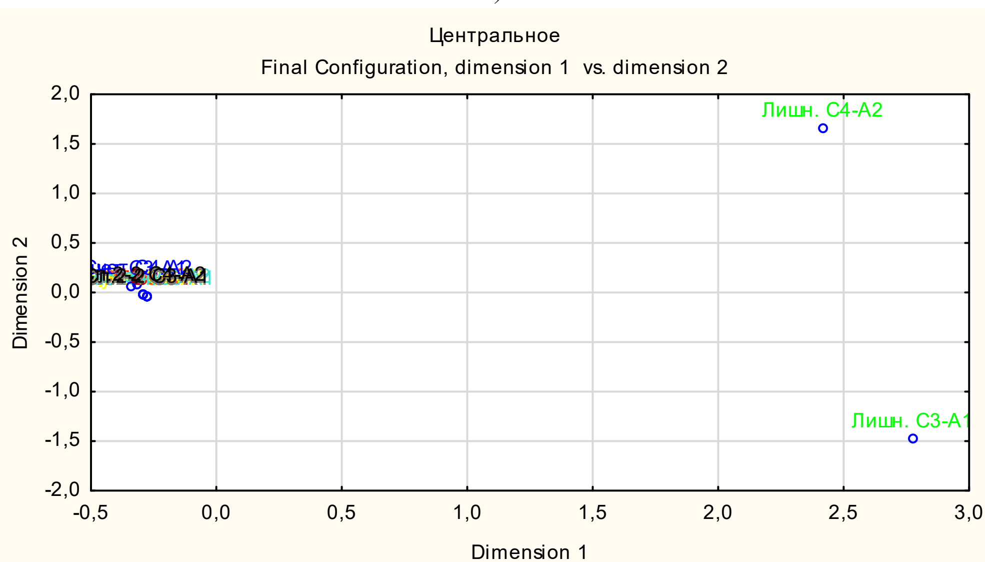
Задача настоящего исследования состоит в доказательстве возможности применения МШ для классификации испытуемых на больных с дисциркуляторной энцефалопатией и здоровых для повышения информативности ЭЭГ-исследования [6].

Материалы и методы. В работе представлены результаты исследования ЭЭГ 5 здоровых испытуемых (контрольная группа) и 5 больных ДЭП. Запись ЭЭГ каждого испытуемого проводилась по международной схеме 10×20 от 16 монополярных отведений на базе аппаратно-программного комплекса «Энцефалан-131-03». Для выявления когнитивных нарушений, проявляющихся при дисциркуляторной энцефалопатии [7,8], съем ЭЭГ осуществлялся при одновременном тестировании пациентов (тестами «Лишнее», «Буква», «Растения», «Счет», «Слова 1–1», «Слова 1–2», «Слова 2–1», «Слова 2–2»). Тест «Лишнее» заключается в выборе лишнего слова из перечисленных четырех в течение 30 секунд. «Буква» — за 30 секунд испытуемым необходимо назвать как можно больше слов на данную букву. «Растения» — назвать как можно больше любых растений за 30 секунд. «Счет» — от числа 300 вычитается 7, из получившегося числа также вычитается 7 в течение 30 секунд. «Слова 1–1», «Слова 1–2» — испытуемым предлагается просмотреть 5 слов, после чего слова убираются, пациентам необходимо повторить увиденные слова через 30 секунд. «Слова 2–1», «Слова 2–2» — аудиальное представление 5 слов, которые необходимо повторить через 30 секунд. «Фон ОГ», «Фон ЗГ» — спонтанная фоновая ЭЭГ без каких-либо воздействий при открытых и закрытых глазах соответственно [9,10]. В данной работе по-отдельности рассматривались отведения, включающие значения амплитуд ЭЭГ каждого из тестов и тесты, включающие значения ЭЭГ-отведений. ЭЭГ данные были обработаны в программе «STATISTICA 12» методом многомерного шкалирования.

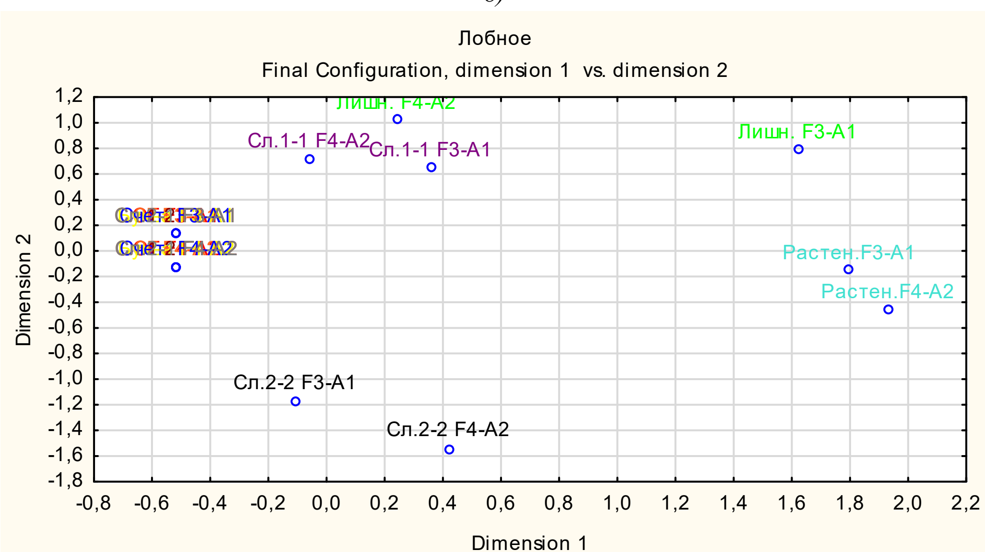
Результаты исследования. В результате визуального анализа графиков многомерного шкалирования здоровых испытуемых отмечено, что распределение попарных координат, соответствующих тестам (отведениям), для каждого из отведений (теста) характеризуется, в большинстве случаев, близким расположением относительно друг друга, в некоторых случаях — совпадением (рис. 1, 2). Исключение у здоровых испытуемых чаще всего составляют точки, определяющие тесты «Лишнее», «Слова 1–1», «Счет» и «Растения»; отведения — нижнелобное (F7–F8), затылочное (O1–O2), задневисочное (T5–T6) и средневисочное (T3–T4). Они наиболее отдалены друг от друга и (или) от остальных точек, обычно сгруппированных в отдельную область.



a)



b)



c)

Рис. 1. Динамика расположения векторов МШ для отведений здоровых испытуемых:
а) испытуемый 1; b) испытуемый 2; c) испытуемый 3

Fig. 1. Location dynamics of MS (multidimensional scaling) vectors for leads of healthy subjects:
a) subject 1; b) subject 2; c) subject 3

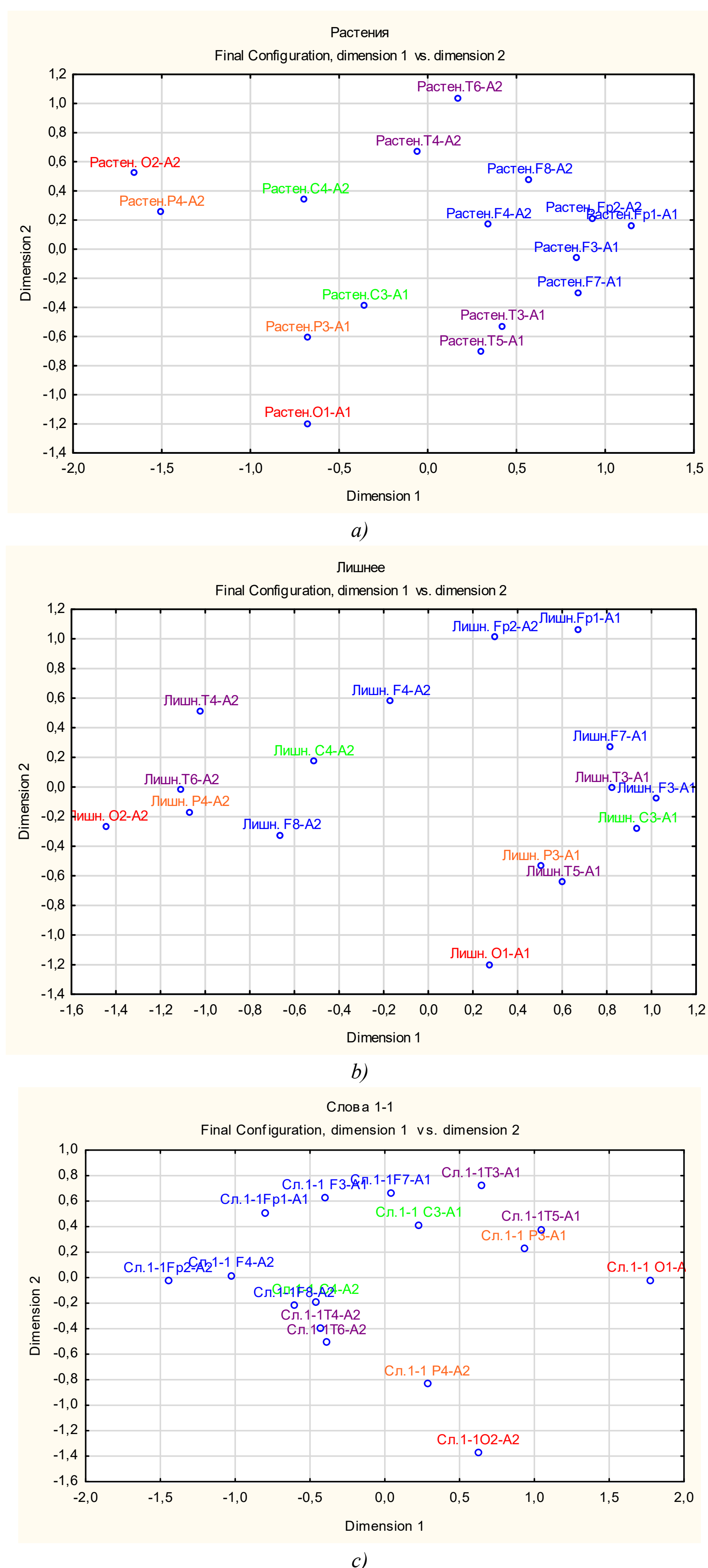


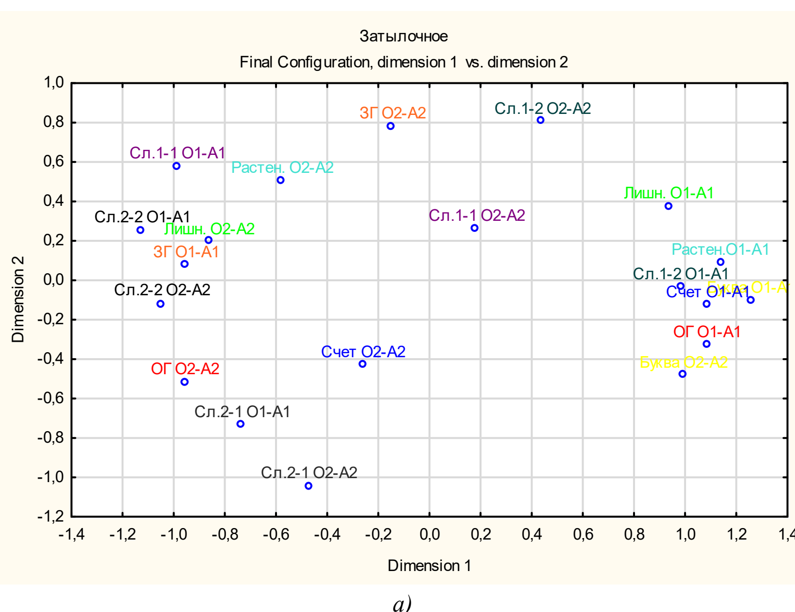
Рис. 2. Динамика расположения векторов МШ для тестов здоровых испытуемых:
а) испытуемый 1; b) испытуемый 2; c) испытуемый 3

Fig. 2. Location dynamics of MS vectors for tests of healthy subjects:
a) subject 1; b) subject 2; c) subject 3

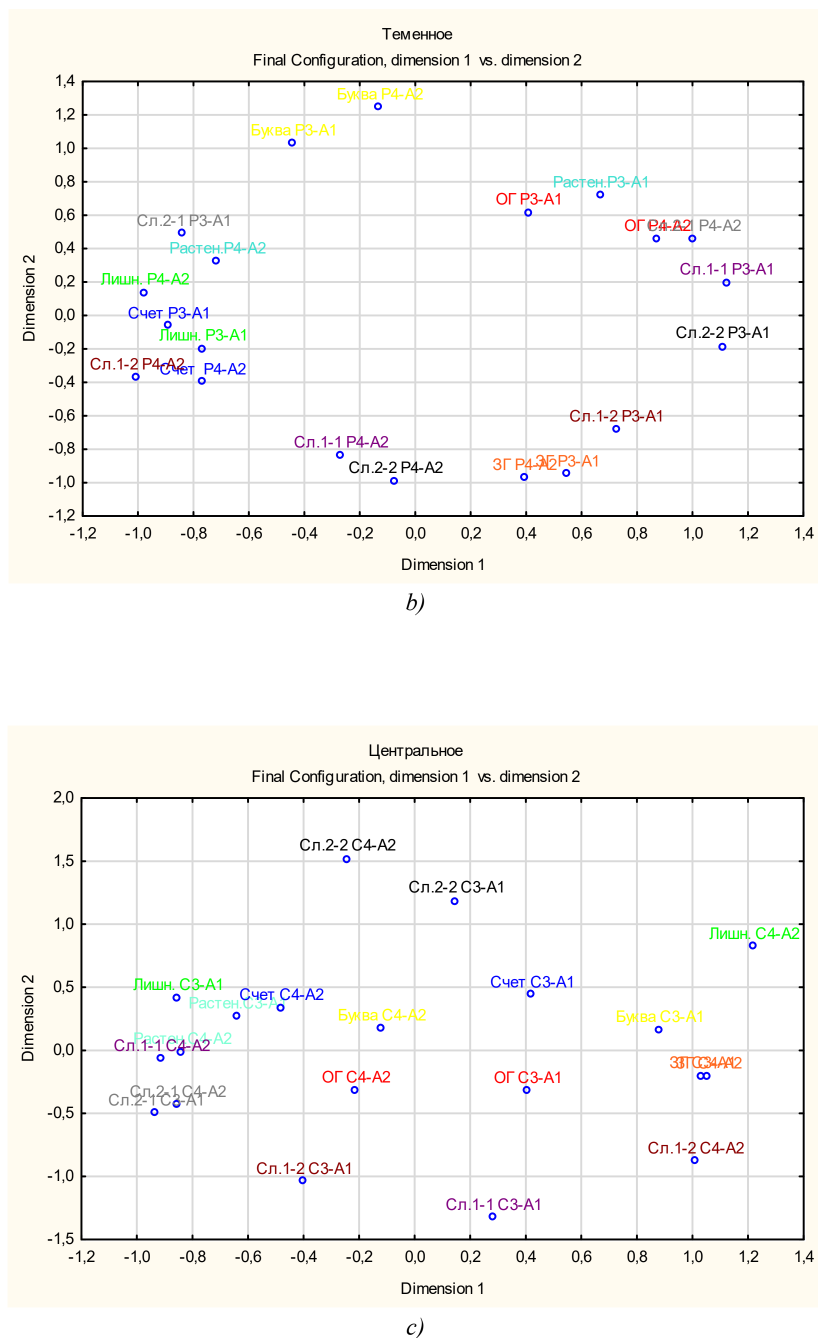
В частности, для графиков распределения координат многомерного шкалирования здоровых пациентов затылочного отведения (O1–O2) характерно значительное расстояние между точками, относящимися к тестам «Лишнее», «Растения», «Слова 1–1». В случае с теменным отведением (P3–P4) наиболее отдалены точки тестов «Лишнее», «Счет», «Слова 1–1». В центральном отведении (C3–C4) далеко друг от друга и от остальных точек расположены точки «Лишнее» и «Слова 1–1». Наиболее отдаленные друг от друга и от остальных совпадающих в лобном отведении (F3–F4) координаты тестов «Лишнее», «Слова 1–1». В лобном полюсном отведении (Fp1–Fp2) точки тестов «Счет» и «Лишнее» локализуются на значительном расстоянии друг от друга. В задневисочном отведении (T5–T6) такими точками являются «Лишнее», «Счет», «Слова 1–1». В средневисочном (T3–T4) — также «Лишнее», «Счет», «Слова 1–1», а в нижнелобном (F7–F8) – «Лишнее», «Счет», «Слова 2–1» и «Растения».

Расположение координат многомерного шкалирования на графиках здоровых испытуемых по тестам, выявляющим когнитивные нарушения, на значительном расстоянии относительно друг друга наблюдается для следующих отведений. Для фоновой ЭЭГ с открытыми и закрытыми глазами наиболее отдалены координаты, относящиеся к затылочному (O1–O2), нижнелобному (F7–F8) и задневисочному (T5–T6) отведениям. Для теста «Буква» точки затылочного (O1–O2) и нижнелобного (F7–F8) отведений также наиболее отдалены друг от друга. «Лишнее» характеризуется отделением координат задневисочного (T5–T6), средневисочного (T3–T4) и нижнелобного (F7–F8) отведений. Тест «Растения» — нижнелобного (F7–F8), задневисочного (T5–T6) и затылочного (O1–O2) отведений. Для теста «Счет» характерно расположение на значительном расстоянии точек отведений: средневисочного (T3–T4), задневисочного (T5–T6) и нижнелобного (F7–F8). Для теста «Слова 1–1» это точки средневисочного (T3–T4) и нижнелобного (F7–F8) отведений. Для тестов «Слова 1–2» и «Слова 2–1» — затылочное (O1–O2) и нижнелобное (F7–F8) отведения. Для «Слова 2–2» — затылочное (O1–O2), нижнелобное (F7–F8) и задневисочное (T5–T6).

У больных пациентов для двумерных плоскостей многомерного шкалирования характерно более хаотичное распределение пространственных координат каждого из отведений или теста. Обособленные группы отсутствуют (рис. 3, 4). На небольшом расстоянии друг от друга чаще всего располагаются парные точки тестов «Слова 2–1», «Лишнее», «Фон ЗГ», «Слова 2–2», «Счет» и «Буква» и отведения – префронтальное (Fp1–Fp2), лобное (F3–F4) и теменное (P3–P4). Наиболее отдалены друг от друга в большинстве случаев координаты тестов «Растения», «Слова 1–1», «Слова 1–2», а также «Лишнее». Таким образом, на графиках, относящихся к больным пациентам, в зависимости от отведения (теста) и испытуемого, расположение точек, соответствующих тестам (отведениям), варьируется сильнее, чем на графиках здоровых испытуемых. При проведении аналогичного исследования ЭЭГ-данных 10-ти здоровых испытуемых и 10-ти больных ДЭП писанные выше результаты подтвердились.



а)

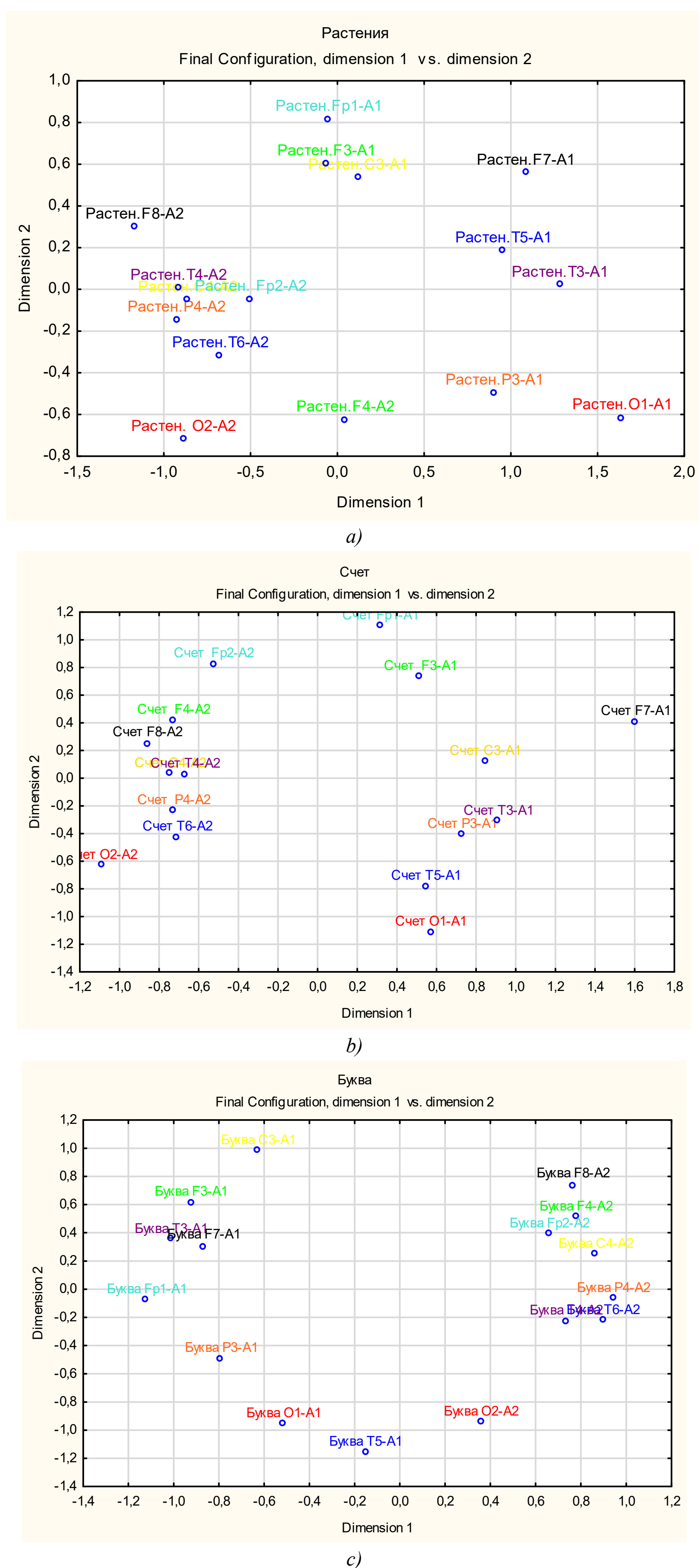


b)

c)

Рис. 3. Динамика расположения векторов МШ для отведений больных испытуемых: a) испытуемый 1; b) испытуемый 3; c) испытуемый 4

Fig. 3. Location dynamics of MS vectors for leads of patient subjects:
a) subject 1; b) subject 2; c) subject 3



a)

b)

c)

Рис. 4. Динамика расположения векторов МШ для тестов больных испытуемых:
а) испытуемый 1; b) испытуемый 2; c) испытуемый 3

Fig. 4. Location dynamics of MS vectors for tests of patient subjects:
a) subject 1; b) subject 2; c) subject 3

Обсуждение и заключения. Доказана возможность применения метода многомерного шкалирования в качестве дополнительного классификатора ЭЭГ-данных больных ДЭП и здоровых испытуемых, исходя из результатов проведенного исследования: практически у всех здоровых испытуемых в каждом из отведений и тестов наблюдается близкое расположение или совпадение координат многомерного шкалирования; для пациентов с ДЭП совпадение координат отсутствует, распределение носит более хаотичный характер.

На основании полученных результатов применения метода многомерного шкалирования выдвинуто предположение о возможности использования этого способа статистической обработки как дополнительного метода в диагностике заболевания «дисциркуляторная энцефалопатия» для оценки состояния пациентов.

Библиографический список

1. Костенко, С. А. Технология применения многомерного шкалирования и кластерного анализа / С. А. Костенко // Фундаментальные исследования. — 2012. — №11-4. — С.927–930.

2. Кижеватова, Е. А. Применение дискриминантного анализа показателей электроэнцефалограммы в диагностике когнитивных нарушений у больных с ишемией головного мозга / Е. А. Кижеватова [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. — 2016. — № 1. — С. 41–44.

3. Омельченко, В. П. Применение дискриминантного анализа для классификации ЭЭГ больных диабетической энцефалопатией / В. П. Омельченко, Е. А. Тимошенко // Инженерный вестник Дона. — 2012. — Т. 22, № 4-1 (22). — С. 16.

4. Кижеватова, Е. А. Анализ биоэлектрической активности головного мозга при когнитивных нарушениях у больных с энцефалопатией / Е. А. Кижеватова, В. П. Омельченко // Известия Южного федерального университета. Технические науки. — 2014. — № 10 (159). — С. 69–77.

5. Timoshenko E.A., Omelchenko V.P. Pathologic brain bioelectrical activity by patients with diabetic and discirculator encephalopathy // 1st International Scientific Conference "Applied Science in Europe: tendencies of contemporary development": Papers of the 1st International Scientific Conference. April 21, 2013, Germany, P. 60–62

6. Электроэнцефалография как метод исследования. Описание и анализ электроэнцефалограммы [Электронный ресурс] / Глубинная психология учения и методики. — Режим доступа https://www.psyoffice.ru/8/psichology/book_o342 _page_68.html (дата обращения : 22.03.17).

7. Timoshenko E.A., Omelchenko V.P. Information Technologies in the Assessment of Violations of Cognitive Functions // European Researcher. – 2013. – Vol. (48), № 5–1. – P. 1136–1139.

8. Новикова, А. И. Многомерное шкалирование ЭЭГ пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией / А. И. Новикова, К. А. Мороз, Е. А. Кижеватова // Юбил. конф. студ. и молод. уч., посв. 85-летию ДГТУ. — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 3092–3098

9. Бакузова, Д. В. Возможности дискриминантного анализа электроэнцефалограммы в диагностике сосудистых умеренных когнитивных расстройств / Д. В. Бакузова, Е. А. Кижеватова // Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии. — 2015. — № 8. — С.41–45.

10. Способ диагностики когнитивных нарушений сосудистого происхождения при хронической ишемии мозга : пат. 2584651 Рос. Федерация: МПК A61B5/0476 (2006.01) / Е. А. Кижеватова, Д. В. Бакузова, В. П. Омельченко, В. В. Ефремов. — № 2015107404/14; заявл. 03.03.15; опубл. 20.05.16, Бюл. №14. — 3с.

References

1. Kostenko, S.A. Tekhnologiya primeneniya mnogomernogo shkalirovaniya i klasternogo analiza. [Technology of using multidimensional scaling and cluster analysis.] Fundamental research, 2012, no. 11 (4), pp. 927–930 (in Russian).

2. Kizhevatova, E.A., et al. Primenenie diskriminantnogo analiza pokazateley elektroentsefalogrammy v diagnostike kognitivnykh narusheniy u bol'nykh s ishemiey golovnogo mozga. [Application of the discriminant analysis of indicators of electroencephalogram in diagnostics of cognitive disorders at patients with cerebral ischemia.] Biomedical Radioelectronics, 2016, no. 1, pp. 41–44 (in Russian).

3. Omelchenko, V.P., Timoshenko, E.A. Primenenie diskriminantnogo analiza dlya klassifikatsii EEG bol'nykh diabeticheskoy entsefalopatiey. [Application of the discriminant analysis for classification of EEG in patients with diabetic encephalopathy.] Engineering Journal of Don, 2012, vol. 22, no. 4-1 (22), pp. 16 –930 (in Russian).

4. Kizhevatova, E.A., Omelchenko, V.P. Analiz bioelektricheskoy aktivnosti golovnogo mozga pri kognitivnykh narusheniyakh u bol'nykh s entsefalopatiey. [The analysis of brain bioelectric activity of cognitive violations for the patients with encephalopathy.] Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2014, no. 10 (159), pp. 69–77 (in Russian).

5. Timoshenko E.A., Omelchenko V.P. Pathologic brain bioelectrical activity by patients with diabetic and discirculator encephalopathy. 1st International Scientific Conference “Applied Science in Europe: tendencies of contemporary development”. Papers of the 1st International Scientific Conference. April 21, 2013, Germany, P. 60–62

6. Elektroentsefalografiya kak metod issledovaniya. Opisanie i analiz elektroentsefalogrammy. [Electroencephalography as an investigative technique. Description and analysis of electroencephalogram.] Glubinnaya psikhologiya ucheniya i metodiki. [Depth psychology of teaching and methods.] Available at: https://www.psyoffice.ru/8/psichology/book_o342_page_68.html (accessed: 22.03.17) (in Russian).

7. Timoshenko E.A., Omelchenko V.P. Information Technologies in the Assessment of Violations of Cognitive Functions. European Researcher, 2013, vol. (48), no. 5–1, pp. 1136–1139.

8. Novikova, A.I., Moroz, K.A., Kizhevatova, E.A. Mnogomernoe shkalirovanie EEG patsientov s distsirkulyatornoy entsefalopatiey. [Multidimensional scaling of EEG in patients with discirculatory encephalopathy.] Yubil. konf. stud. i molod. uch., posv. 85-letiyu DGTU. [Festive Conf. of Students and Young Researchers dedicated to 85th anniversary of DSTU.] Rostov-on-Don, 2015, pp. 3092–3098 (in Russian).

9. Bakuzova, D.V., Kizhevatova, E.A. Vozmozhnosti diskriminantnogo analiza elektroentsefalogrammy v diagnostike. [The discriminant analysis of electroencephalogram in the diagnosis of vascular mild cognitive impartment.] Vestnik nevrologii, psikhiatrii i neyrokhirurgii, 2015, no. 8, pp. 41–45 (in Russian).

10. Kizhevatova, E.A., Bakuzova, D.V., Omelchenko, V.P., Yefremov, V.V. Sposob diagnostiki kognitivnykh narusheniy sosudistogo proiskhozhdeniya pri khronicheskoy ishemii mozga: pat. 2584651 Ros. Federatsiya: MPK A61B5/0476 (2006.01). [Diagnostic method for cognitive vascular disorders in case of chronic cerebral ischemia.] Patent RF, no. 2584651, 2016 (in Russian).

Поступила в редакцию 22.03.2017
Сдана в редакцию 29.03.2017
Запланирована в номер 03.04.2017

Received 22.03.2017
Submitted 29.03.2017
Scheduled in the issue 03.04.2017

Об авторах:

Новикова Анна Ивановна,
магистрант кафедры «Приборостроение» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-8758-4947
novikova.anna16@yandex.ru

Мороз Калерия Александровна,
доцент кафедры «Приборостроение» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), кандидат технических наук,
ORCID: http:// orcid.org/0000-0001-8624-0184
leramoroz@mail.ru

Кижеватова Елена Александровна,
ассистент кафедры медицинской и биологической физики Ростовского государственного медицинскоо университета (РФ, 344022, г. Ростов–на–Дону, пер. Нахичеванский, 29),
ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-7127-0214
alyonatim@mail.ru

Authors:

Novikova Anna I.,
undergraduate of the Instrument Production Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-8758-4947
novikova.anna16@yandex.ru

Moroz Kaleria A.,
associate professor of the Instrument Production Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http:// orcid.org/0000-0001-8624-0184
leramoroz@mail.ru

Kizhevatova Elena A.,
teaching assistant of the Medical and Biological Physics Department, Rostov State Medical University (RF, 344022, Rostov-on-Don, Nakhichevanskiy per., 29),
ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-7127-0214
alyonatim@mail.ru

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 681.3.681.5 10.23947/1992-5980-2017-17-3-137-144

Сравнение эффективности работы точных и приближенных алгоритмов для решения задачи о покрытии множества*

И. С. Коновалов[1], С. С. Остапенко[2], В. Г. Кобак[3]**
[1,2,3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Efficiency comparison of exact and approximate algorithms for solving set covering problem***

I. S. Konovalov[1], S. S. Ostapenko[2], V. G. Kobak[3]**
[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Множество практических задач опирается на задачу покрытия множеств: построение расписаний, расположение пунктов обслуживания, построение электронных схем. Это определяет актуальность поиска способов повышения эффективности решения данной задачи.
Материалы и методы. Рассматриваются методы решения задачи о покрытии множества точным и приближенным алгоритмами. В качестве приближенного метода используется генетический алгоритм, в качестве точного — метод ветвей и границ.
Результаты исследования. Генетический алгоритм во всех своих модификациях по временным характеристикам показал предсказуемость и стабильность во всех сериях экспериментов. Метод ветвей и границ был применен к задаче покрытия множеств и показал точные результаты.
Обсуждение и заключения. Проведенные исследования показали, что для множеств небольших размеров целесообразно использовать метод ветвей и границ, который продемонстрировал быстрое время выполнения при гарантированно точном результате. Для множеств больших размеров рекомендуется использовать генетический алгоритм, который гарантирует результат с незначительной погрешностью, причем изменение времени его работы стабильно и предсказуемо.

Introduction. A quite general class of practical tasks is guided by the set covering problem: schedules building, layout of service stations, and creation of electronic circuits. It defines relevance of searching methods to improve the solution efficiency of this task.
Materials and Methods. Techniques of the set covering problem solution by exact and approximate algorithms are considered. The genetic algorithm is used as the approximate method, and the branch and bounds algorithm – as the exact method.
Research Results. The genetic algorithm in all its modifications on time response characteristics has shown predictability and stability in all series of experiments. The branch and bounds method was applied to the set covering task, and it has shown exact results.
Discussion and Conclusions. The conducted research shows that for small sets, it is expedient to use the branch and bounds method which has demonstrated fast runtime with an assured exact result. For large sets, it is recommended to use the genetic algorithm which guarantees receiving a result with a negligible error where the execution time shift is stable and predictable.

Ключевые слова: Задача покрытия множества, генетический алгоритм, модель Голдберга, алгоритм полного перебора, метод ветвей и границ, алгоритм Алексеева.

Keywords: set covering problem, genetic algorithm, Goldberg model, exhaustive algorithm, branch-and-bound method, Alekseev algorithm.

Образец для цитирования: Коновалов, И. С. Сравнение эффективности работы точных и приближенных алгоритмов для решения задачи о покрытии множества / И. С. Коновалов, С. С. Остапенко, В. Г. Кобак // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 137–144.

For citation: I.S. Konovalov, S.S. Ostapenko, V.G. Kobak. Efficiency comparison of exact and approximate algorithms for solving set covering problem. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 137–144.

Введение. Наиболее важным классом задач в теории алгоритмов является класс *NP*-полных задач. На сегодняшний день нахождение оптимальных решений в этой области не перестает быть актуальным. В частности, большое количество прикладных задач можно свести к задаче о покрытии множества. Примерами могут являться многие задачи дискретной оптимизации: задачи стандартизации, упаковки и разбиения множества, задача о наибольшей клике, построение расписаний. Известна также и обратная сводимость задачи о покрытии к этим задачам.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: e-mail:xigorx92@mail.ru, cj-x@yandex.ru, valera33305@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

На практике задачи о покрытии возникают при размещении пунктов обслуживания, в системах информационного поиска, при назначении экипажей на транспорте, проектировании интегральных схем и конвейерных линий и т. д.

Постановка задачи. Дано множество U из n элементов и набор подмножеств U, $S=\{S_1,\ldots, S_k\}$. Каждому подмножеству S_i сопоставлена некоторая неотрицательная стоимость c: $S\to Q^+$. $S'\subseteq S$ является покрытием, если любой элемент из U принадлежит хотя бы одному элементу из S' [1–3].

Задача о покрытии множествами заключается в нахождении набора подмножеств, покрывающего все множество U и имеющего минимально возможный вес (в случае взвешенной задачи) или минимально возможное число подмножеств (в случае невзвешенной задачи).

Можно представить задачу в матричном виде [4, 5]. Пусть $A=(a_{ij})$ — произвольная матрица размера mхn с элементами $a_{ij}\in\{0,1\}$ без нулевых строк и столбцов. Будем говорить, что в A строка i покрывается столбцом j, если $a_{ij}=1$. Подмножество столбцов называется покрытием, если в совокупности они покрывают все строки матрицы A. Пусть каждому столбцу поставлено в соответствие положительное число c_j, называемое весом столбца. Требуется найти покрытие минимального суммарного веса. Вводя переменные x_j, равные единице, если столбец j входит в искомое покрытие, и равные нулю в противном случае, приходим к следующей формулировке задачи о покрытии:

$$\sum_{j=1}^{n} c_j x_j \to \min, \tag{1}$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \geq 1, i=1,...m, x_j \in \{0,1\}, j=1,...,n\ . \tag{2}$$

Целью данного исследования является выявление целесообразности использования некоторых алгоритмов для решения задачи о покрытии множества на основе сравнения эффективности их работы по критериям быстродействия и точности. Для сравнения были выбраны: генетический алгоритм, метод ветвей и границ, алгоритм полного перебора.

Генетический алгоритм. Генетические алгоритмы основаны на идеях естественного отбора и наследования и относятся к вероятностным эвристическим методам [6–9].

В настоящем исследовании используется модифицированная модель Голдберга: оптимизационной функцией является минимизация веса покрытия, а условием останова — неизменность лучшего решения в течение заданного числа поколений. Особенностью исследуемого алгоритма является то, что в кроссовере участвуют все особи текущего поколения. Кроме того, для каждого потомка применяется оператор мутации.

Рассмотрим механизм кодирования особи. Каждый индивид k представлен хромосомой, являющейся n-мерным вектором x_k, у которого j-й элемент x_{kj} принимает значение 1, если подмножество S_j входит в покрытие, а в ином случае принимает значение 0. С таким представлением степень приспособленности f_k индивида x_k может быть рассчитана следующим образом:

$$f_k = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j^k, \tag{3}$$

где c_j — стоимость подмножества S_j.

Таким образом, оптимизационная функция выглядит как $f_k\to\min$.

Для выбора родительских особей используется случайный отбор. Также применяется стратегия элитного отбора для улучшения точности результата без временных затрат: элитная особь формируется в первом поколении с помощью жадного алгоритма, описанного в статье [1].

В алгоритме используется тип мутации, основанный на изменении случайного гена на противоположное значение. Оператор скрещивания точечный. Выбираются пары хромосом из родительской популяции. Далее для каждой пары отобранных таким образом родителей разыгрывается позиция гена (локус) в хромосоме, определяющая так называемую точку скрещивания — l_k. В результате скрещивания пары родительских хромосом получается следующая пара потомков: P_1 — потомок, хромосома которого на позициях от 1 до l_k состоит из генов первого родителя, а на позициях от l_k+1 до L — из генов второго родителя; P_2 — потомок, хромосома которого на позициях от 1 до l_k состоит из генов второго родителя, а на позициях от l_k+1 до L — из генов первого родителя. Начальное поколение формируется из особей, соответствующих найденным случайным образом покрытий.

Особенность работы генетического алгоритма состоит в том, что при скрещивании и мутации могут появиться особи, соответствующие покрытия которых не существуют, то есть являющиеся недопустимыми решениями. От этих решений необходимо избавляться. Алгоритм проверяет, существует ли покрытие, и если нет, то пытается, в случае скрещивания, выбрать другую вторую родительскую особь, а в случае мутации — выбрать другой

ген для его инвертирования. Если и это не «исправит» особь, родитель выберется заново случайным образом. Потомок заменяет случайно выбранную особь, если его приспособленность выше.

Алгоритм полного перебора (брутфорс). Полный перебор — точный метод решения оптимизационных задач, относящийся к классу методов поиска решения исчерпыванием всевозможных вариантов. Сложность полного перебора зависит от количества всех возможных решений задачи.

Полным перебором можно решить любую задачу из класса *NP*-полных задач. В зависимости от количества всех возможных решений задачи и времени вычисления целевой функции от каждого решения полный перебор может потребовать экспоненциального времени работы.

Идея алгоритма полного перебора для решения задачи покрытия заключается в следующем:

1) поиск всех возможных сочетаний подмножеств исходного множества и сравнение их целевых функций;
2) определение покрытий среди найденных сочетаний;
3) нахождение покрытия минимального веса.

Из теории множеств известно, что число всех подмножеств множества из n элементов равно 2^n. Другими словами,

$$\sum_{k=0}^{n} C_n^k = 2^n. \quad (4)$$

Метод ветвей и границ. Данный метод является модификацией алгоритма полного перебора, что гарантирует точность результата его работы. Суть метода заключается в построении дерева полного перебора и отсечении бесперспективных ветвей решения по мере его обхода, что существенно уменьшает время его работы [10]. Условия задачи описываются формулами (1) и (2). Дерево перебора в этом случае строится так, что на каждом уровне k для каждого из узлов k–1 уровня добавляются в качестве дочерних узлов все возможные варианты $a_{kj} \cdot x_j$. Для поставленной задачи на каждом уровне добавляется количество узлов, равное количеству $a_{kj} \neq 0$. Алгоритм полного перебора предполагает полный обход такого дерева. Алгоритм после обработки каждого узла k-ого уровня приступает к обработке дочерних узлов прежде, чем переходит к следующему узлу k-ого уровня. Метод ветвей и границ сокращает время поиска оптимального решения за счет того, что при вхождении в каждый узел выполняется верхняя и/или нижняя оценка возможного решения, к которому приведет обход поддерева, корнем которого является текущий узел. В соответствии с полученной оценкой делается вывод — если лучшее из возможных решений хуже текущего, то данное поддерево (ветвь) отсекается и обход продолжается со следующего узла того же уровня, на котором было произведено отсечение.

Таким образом, ключевым аспектом работы алгоритма по методу ветвей и границ является эффективная оценка поддерева, обязательным требованием к которой также является недопустимость потери точности. Поскольку алгоритм оценки поддерева опирается на текущее решение, инициализация начального решения оставляется на усмотрение разработчика. Возможны четыре варианта инициализации:

1) заполнение решения максимальными значениями;
2) выбор случайного покрытия;
3) последовательная инициализация лучшими значениями (алгоритм Алексеева);
4) нахождение решения приближенным алгоритмом.

Поскольку многообразие и эффективность работы приближенных алгоритмов являются отдельным предметом исследования, для данного исследования их использование в качестве начального значения недопустимо. В связи с этим был выбран вариант инициализации по алгоритму Алексеева: последовательно, на каждом шаге в решение добавляется такая переменная x_j, которая дает на данном шаге лучшее решение. Если таких переменных несколько, выбирается первая найденная.

Для задачи покрытия множеств был разработан следующий оценочный метод. Пусть N — текущее решение задачи, то есть минимальное найденное количество подмножеств S_i, покрывающих исходное множество U. В таком случае, минимальное улучшение равняется N–1. Текущим состоянием M назовем число подмножеств S_i, покрывающих сформированный на данном этапе набор $x_1 x_2 \dots x_j$. При $M=N-1$ выполняется проверка: если среди непокрытых переменных x_j есть хотя бы одна, которая не покрывается подмножествами S_i, формирующими состояние M, то минимальное улучшение невозможно, следовательно, данная ветвь считается бесперспективной и отбрасывается. В противном случае текущее состояние M становится текущим решением задачи.

Входные данные и исходные параметры алгоритмов. В качестве входных данных для всех алгоритмов взята матрица A, представленная формулой (2).

Для сравнения эффективности работы были выбраны генетический алгоритм и метод ветвей и границ.

В качестве исходных параметров генетического алгоритма установлены: вероятность скрещивания — 100%, вероятность мутации — 100%. Для исследования выбрано 3 варианта с различным количеством особей — 100, 200 и

300. Для улучшения точности результата используется принцип элитного отбора. Для метода ветвей и границ начальное решение формируется алгоритмом Алексеева.

Подтверждение точности метода ветвей и границ. С целью подтверждения точности алгоритма по методу ветвей и границ, а также доказательства его эффективности по временным показателям, были проведены серии экспериментов по сравнению его работы с работой алгоритма полного перебора на матрицах различного размера.

В представленных ниже таблицах приведены усредненное значение результата и среднее время работы в миллисекундах, алгоритм полного перебора обозначен «АПП», метод ветвей и границ — «ВиГ».

Таблица 1
Table 1

Результаты экспериментов при размере матрицы А — 10х10; количестве экспериментов — 500
Results of experiments with A matrix size — 10x10; number of experiments — 500

	АПП	ВиГ
Результат	2,288	2,288
Время, мс	0,8343	0,0181

Таблица 2
Table 2

Результаты экспериментов при размере матрицы А — 15х15; количестве экспериментов — 500
Results of experiments with A matrix size — 15x15; number of experiments — 500

	АПП	ВиГ
Результат	2,398	2,398
Время, мс	56,6256	0,0617

Таблица 3
Table 3

Результаты экспериментов при размере матрицы А — 20х20; количестве экспериментов — 500
Results of experiments with A matrix size — 20x20; number of experiments — 500

	АПП	ВиГ
Результат	2,612	2,612
Время, мс	3133,0340	0,1183

Таблица 4
Table 4

Результаты экспериментов при размере матрицы А — 25х25; количестве экспериментов — 500
Results of experiments with A matrix size — 25x25; number of experiments — 500

	АПП	ВиГ
Результат	2,614	2,614
Время, мс	155340,0994	0,2492

Четыре серии экспериментов (суммарно 1600) не выявили ни одного расхождения результатов работы алгоритмов полного перебора и метода ветвей и границ. Таким образом, точность метода ветвей и границ доказана не только теоретически, но и экспериментально.

По временным показателям метод ветвей и границ сработал быстрее во всех 4 сериях экспериментов: для матрицы размером 10х10 — в 46 раз, 15х15 — в 918 раз, 20х20 — в 26 480 раз и для 25х25 — в 623 451 раз.

Данные результаты позволяют сделать однозначный вывод о преимуществе использования метода ветвей и границ перед алгоритмом полного перебора и в дальнейшем в исследовании в качестве точного алгоритма будет использоваться только метод ветвей и границ.

Сравнение эффективности работы точных и приближенных алгоритмов. В данном исследовании для сравнения было выбрано 4 алгоритма: 3 модификации генетического алгоритма с использованием элиты, с количествами особей 100 (ГА100), 200 (ГА200) и 300 (ГА300), а также алгоритм по методу ветвей и границ (ВиГ).

В представленных ниже таблицах приведены усредненное значение результата (для вычисления среднего отклонения) и среднее время работы в миллисекундах.

Таблица 5

Table 5

Результаты экспериментов при размере матрицы A — 20x20; количестве экспериментов — 500

Results of experiments with A matrix size — 20x20; number of experiments — 500

	ГА100	ГА200	ГА300	ВиГ
Результат	2,688	2,684	2,684	2,684
Время, мс	426,154	1033,16	1435,32	0,18

Таблица 6

Table 6

Результаты экспериментов при размере матрицы A — 50x50; количестве экспериментов — 500

Results of experiments with A matrix size — 50x50; number of experiments — 500

	ГА100	ГА200	ГА300	ВиГ
Результат	3,112	3,024	3	3
Время, мс	1406,05	3443,07	5266,25	8,21

Таблица 7

Table 7

Результаты экспериментов при размере матрицы A — 75x75; количестве экспериментов — 500

Results of experiments with A matrix size — 75x75; number of experiments — 500

	ГА100	ГА200	ГА300	ВиГ
Результат	3,846	3,684	3,572	3,142
Время, мс	1724,13	3553,52	5437,28	320,64

Таблица 8

Table 8

Результаты экспериментов при размере матрицы A — 85x85; количестве экспериментов — 200

Results of experiments with A matrix size — 85x85; number of experiments — 200

	ГА100	ГА200	ГА300	ВиГ
Результат	4,01	3,925	3,85	3,445
Время, мс	2030,56	4159,29	6354,38	8851,48

Таблица 9

Table 9

Результаты экспериментов при размере матрицы A — 85x85; количестве экспериментов — 400

Results of experiments with A matrix size — 85x85; number of experiments — 400

	ГА100	ГА200	ГА300	ВиГ
Результат	3,904	3,8275	3,8225	3,395
Время, мс	2202,56	4312,41	6394,33	2892,97

Таблица 10
Table 10

Результаты экспериментов при размере матрицы А — 90х90; количестве экспериментов — 300
Results of experiments with A matrix size — 90x90; number of experiments — 300

	ГА100	ГА200	ГА300	ВиГ
Результат	3,96	3,93	3,91	3,56
Время, мс	2080,22	4735,22	7088,39	1926,04

Таблица 11
Table 11

Результаты экспериментов при размере матрицы А — 100х100; количестве экспериментов — 100
Results of experiments with A matrix size — 100x100; number of experiments — 100

	ГА100	ГА200	ГА300	ВиГ
Результат	3,98	3,99	3,95	3,79
Время, мс	4448,63	9450,40	14296,89	3655,89

Таблица 12
Table 12

Результаты экспериментов при размере матрицы А — 100х100; количестве экспериментов — 200
Results of experiments with A matrix size — 100x100; number of experiments — 200

	ГА100	ГА200	ГА300	ВиГ
Результат	4,015	3,995	3,924	3,85
Время, мс	4374,55	9291,33	15378,67	38932,69

Анализ полученных результатов. В сериях экспериментов 1, 2 и 3 точный алгоритм по методу ветвей и границ показал убедительное преимущество в скорости работы, превзойдя самую быструю модификацию генетического алгоритма (ГА100) в 2367,5 раз в первом случае, в 171,26 во втором и в 52,82 в третьем.

Однако, начиная с четвертой серии экспериментов, время работы алгоритма по методу ветвей и границ сильно варьируется и показывает весь спектр результатов от лучшего к худшему. Объясняется это тем, что ход работы алгоритма сильно зависит от входной матрицы. При большой плотности единиц разветвленность дерева больше, а также больше ветвей, в которых оценка возможна лишь ближе к листьям. То есть, несмотря на то, что время работы метода ветвей и границ будет всегда меньше, чем время работы алгоритма полного перебора T, в худшем случае время данного метода может стремиться к $\frac{T}{n}$, где n — некоторая константа.

Генетический алгоритм во всех модификациях по временным характеристикам показал предсказуемость и стабильность во всех сериях экспериментов. Среднее отклонение от точного результата для ГА100 составило 9,77%, для ГА200 — 8,13%, для ГА300 — 6,68%. Вышеизложенные результаты позволяют сделать вывод о том, что с ростом количества особей улучшается точность генетического алгоритма.

Выводы. Проведенные исследования показали, что для множеств небольших размеров (до 75 элементов включительно) целесообразно использовать метод ветвей и границ, который продемонстрировал высокое быстродействие при гарантии точного результата. Для множеств больших размеров рекомендуется использовать генетический алгоритм, который гарантирует получение результата с незначительной погрешностью, но за определенный фиксированный промежуток времени. Метод же ветвей и границ, по результатам проведенных экспериментов, с увеличением размера входных данных может вести себя непредсказуемо.

Библиографический список

1. Коновалов, И. С. Сравнительный анализ работы жадного алгоритма Хватала и модифицированной модели Голдберга при решении взвешенной задачи нахождения минимального покрытия множеств / И. С. Коновалов, В. А. Фатхи, В. Г. Кобак // Труды СКФ МТУСИ. — Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2015 — С. 366–371.

2. Коновалов, И. С. Стратегия элитизма модифицированной модели Голдберга генетического алгоритма при решении задачи покрытия множеств / И. С. Коновалов, В. А. Фатхи, В. Г. Кобак // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2016. — №4. — С. 50–56.

3. Коновалов, И. С. Применение генетического алгоритма для решения задачи покрытия множеств / И. С. Коновалов, В. А. Фатхи, В. Г. Кобак // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 3. — С. 125–132.

4. Еремеев, А. В. Генетический алгоритм для задачи о покрытии / А. В. Еремеев // Дискретный анализ и исследование операций. — 2000. — Т. 7, № 1. — С. 47–60.

5. Еремеев, А. В. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования / А. В. Еремеев, Л. А. Заозерская, А. А. Колоколов // Дискретный анализ и исследование операций. — 2000. — Т. 7, № 2. — С. 22–47.

6. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. — The University of Michigan Press, 1975. — P. 245.

7. Goldberg, D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989. — P. 432.

8. Батищев, Д. И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач / Д. И. Батищев. — Воронеж : изд-во Воронеж. гос. техн. ун-та, 1995. — 121 с.

9. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 368 с.

10. Алексеев, О. Г. Некоторые алгоритмы решения задачи о покрытии и их экспериментальное исследование на ЭВМ / О. Г. Алексеев, В. Ф. Григорьев // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 1984. — Т. 24, №10. — С. 1565–1570.

References

1. Konovalov, I.S., Fatkhi, V.A., Kobak, V.G. Sravnitel'nyy analiz raboty zhadnogo algoritma Khvatala i modifitsirovannoy modeli Goldberga pri reshenii vzveshennoy zadachi nakhozhdeniya minimal'nogo pokrytiya mnozhestv. [Comparative analysis of work of Chvatal greedy algorithm and modified Goldberg model under solving the problem on determining minimal set covering.] Trudy SKF MTUSI. Rostov-on-Don: PTs «Universitet» SKF MTUSI, 2015, pp. 366–371 (in Russian).

2. Konovalov, I.S., Fatkhi, V.A., Kobak, V.G. Strategiya elitizma modifitsirovannoy modeli Goldberga geneticheskogo algoritma pri reshenii zadachi pokrytiya mnozhestv. [Elitism strategy of modified Goldberg model of genetic algorithm in solving the set covering problem.] Herald of Computer and Information Technologies, 2016, no. 4, pp. 50–56 (in Russian).

3. Konovalov, I.S., Fatkhi, V.A., Kobak, V.G. Primenenie geneticheskogo algoritma dlya resheniya zadachi pokrytiya mnozhestv. [Application of genetic algorithm for the set-covering problem solution.] Vestnik of DSTU, 2016, no. 3pp. 125–132 (in Russian).

4. Eremeev, A.V. Geneticheskiy algoritm dlya zadachi o pokrytii. [A genetic algorithm for the covering problem.] Discrete Analysis and Operations Research, 2000, ser. 2, vol. 7, no. 1, pp. 47–60 (in Russian).

5. Eremeev, A.V., Zaozerskaya, L.A., Kolokolov, A.A. Zadacha o pokrytii mnozhestva: slozhnost', algoritmy, eksperimental'nye issledovaniya. [The set covering problem: complexity, algorithms, and experimental investigations.] Discrete Analysis and Operations Research, 2000, ser.2, vol. 7, no. 2, pp. 22–47 (in Russian).

6. Holland, J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press, 1975, p. 245.

7. Goldberg, D.E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989, p. 432.

8. Batishchev, D.I. Geneticheskie algoritmy resheniya ekstremal'nykh zadach. [Genetic algorithms for solving extremal problems.] Voronezh: izd-vo Voronezh. gos. tekhn. un-ta, 1995, 121 p. (in Russian).

9. Gladkov, L.A., Kureychik, V.V., Kureychik, V.M. Geneticheskie algoritmy. [Gtnetic algorithms.] Moscow: FIZMATLIT, 2010, 368 p. (in Russian).

10. Alekseev, O.G., Grigoryev, V.F. Nekotorye algoritmy resheniya zadachi o pokrytii i ikh eksperimental'noe issledovanie na EVM. [Some algorithms for solving the covering problem and their experimental computed study.] Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1984, vol. 24, no. 10, pp. 1565–1570 (in Russian).

Поступила в редакцию 22.05.2017
Сдана в редакцию 23.05.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 22.05.2017
Submitted 23.05.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Коновалов Игорь Сергеевич,
аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http:// orcid.org/0000-0001-6296-3660
xigorx92@mail.ru

Остапенко Сергей Сергеевич,
аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-8711-5059
cj-x@yandex.ru

Кобак Валерий Григорьевич,
профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук профессор,
ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-1001-0574
valera33305@mail.ru

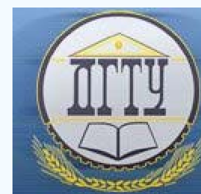
Authors:

Konovalov, Igor S.,
postgraduate student of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http:// orcid.org/0000-0001-6296-3660
xigorx92@mail.ru

Ostapenko, Sergey S.,
postgraduate student of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-8711-5059
cj-x@yandex.ru

Kobak, Valery G.,
associate professor of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-1001-0574
valera33305@mail.ru

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 003.26 10.23947/1992-5980-2017-17-3-145-155

Алгоритмическая оценка сложности системы кодирования и защиты информации, основанной на пороговом разделении секрета, на примере системы электронного голосования*

Л. В. Черкесова[1], О. А. Сафарьян[2], А. В. Мазуренко[3], Н. С. Архангельская[4]**

[1, 2, 3, 4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Complexity calculation of coding and information security system based on threshold secret sharing scheme used for electronic voting***

L. V. Cherkesova[1], O. A. Safaryan[2] , A. V. Mazurenko[3], N. S. Arkhangelskaya[4]**

[1, 2, 3, 4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Одной из задач криптографии является обеспечение безопасного и честного проведения электронного голосования. При такой процедуре избиратели подают голоса в электронном виде — например, через электронные терминалы. В работе предложен новый алгоритм порогового разделения секрета для проведения электронного голосования.

Материалы и методы. При решении поставленной исследовательской задачи использованы теория конечных полей, теория алгоритмов, проективная геометрия и линейная алгебра. Разработанная криптосистема основана на применении геометрических объектов из проективной геометрии, что позволяет задействовать аппарат линейной алгебры для эффективного решения криптографических задач. Для оценки сложности работы описанных алгоритмов использованы классические результаты из теории алгоритмов.

Результаты исследования. В работе описаны криптографические алгоритмы разделения секрета и его последующего восстановления, основанные на использовании особенностей построения проективных пространств над конечными полями и их связи с полями Галуа подходящего порядка. Подробно описаны составные части данных алгоритмов, а именно: метод построения инъективного отображения, действующего из кольца вычетов по простому модулю в проективное пространство над конечным полем определенной размерности; способ генерации секретных долей и секрета; процедура разделение секрета и его последующего восстановления. Приведены алгоритмические оценки временной сложности описанных формальных алгоритмов.

Обсуждение и заключения. Предложенная схема может быть применена для проведения электронных выборов, а также в иных областях, где естественным образом возникает необходимость в применении методов пороговой криптографии.

Introduction. One of the tasks arising in cryptography is to ensure the safe and honest conduct of e-voting. This procedure provides that voters submit their votes electronically – for example, through electronic terminals. A new algorithm for the distribution of threshold sensitive data for electronic voting is proposed.

Materials and Methods. The results are obtained on the basis of the following methodology: finite field theory, theory of algorithms, projective geometry, and linear algebra. The developed cryptosystem is based on the application of geometric objects from projective geometry which makes it possible to use the apparatus of linear algebra to make effective decisions on cryptographic problems. To estimate the complexity of the described algorithms, classical results from the theory of algorithms are applied.

Research Results. This paper describes the cryptographic algorithms of secret sharing and its subsequent restoration based on special structural properties of projective spaces over finite fields, and their link with Galois fields of the appropriate order. The component parts of these algorithms, specifically, the construction of injective mapping from a residue ring prime modulo into the projective space over finite field of specific dimension; the generation of secret shares and secret; the procedure of secret sharing and its restoration, are described in great detail. The algorithmic time complexity calculations of the formal algorithms are given.

Discussion and Conclusions. The described scheme is useful for electronic voting and in other spheres where methods of threshold cryptography are applied.

Ключевые слова: криптография, электронное голосование, пороговая криптография, разделение секрета, криптосистема Эль-Гамаля, криптосистема с открытым ключом, криптографический секрет, криптографический алгоритм, информационная безопасность, криптографический ключ

Keywords: cryptography, electronic voting, threshold cryptography, secret sharing, ElGamal encryption system, public-key cryptography, cryptographic secret, cryptographic algorithm, information security, cryptographic key.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: mazurencoal@gmail.com, arh.iv@bk.ru, chia2002@inbox.ru, safari_2006@mail.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Образец для цитирования: Черкесова, Л. В. Алгоритмическая оценка сложности системы кодирования и защиты информации, основанной на пороговом разделении секрета, на примере системы электронного голосовани / Л. В. Черкесова, О. А. Сафарьян, А. В. Мазуренко, Н. С. Архангельская // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 145‒155.

For citation: I L.V. Cherkesova, O.A. Safaryan, A.V. Mazurenko, N.S. Arkhangelskaya. Complexity calculation of coding and information security system based on threshold secret sharing scheme used for electronic voting. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 145‒155.

Введение. Одной из задач, которые возникают в криптографии, является обеспечение безопасного и честного проведения электронного голосования. Такая процедура предусматривает, что избиратели подают голоса в электронном виде — например, через электронные терминалы. Это ключевое отличие электронного голосования от традиционных выборов, в ходе которых избиратели заполняют бюллетени на избирательных участках, а подсчет голосов осуществляется избирательными комиссиями вручную. До недавнего времени электронное голосование рассматривалось как теоретическая задача в области криптографии. Однако в последние несколько лет положение дел изменилось. В США и в странах Европейского Союза активно обсуждаются возможности проведения президентских выборов и выборов в парламенты этих государств с использованием электронных систем.

В созданной ранее криптосистеме [1] описан алгоритм порогового разделения секрета для проведения электронного голосования. В криптосистеме [1] можно выделить три вида участников: проверяющие, избиратели и администратор. Администратор генерирует закрытый и публичный ключи согласно усиленному варианту схемы Эль-Гамаля [2, 3]. Закрытый ключ разбивается на секретные доли, которые распределяются между проверяющими, состоящими в одной команде. Для каждой команды проверяющих создаются свои уникальные секретные доли. Далее избиратели голосуют за одну из кандидатур и зашифровывают свой «голос» при помощи открытого ключа. Зашифрованное сообщение отправляется на сервер, доступ к которому имеют только проверяющие. После завершения голосования команды проверяющих распределяют между собой шифротексты, восстанавливают секретный ключ и дешифруют принятые от избирателей сообщения. В результате все команды предоставляют дешифрованные голоса, суммируют их и объявляют результаты выборов. Сложность взлома построенной криптосистемы эквивалента сложности решения общепризнанно трудной задачи принятий решения Диффи-Хеллмана в некоторой циклической Абелевой группе [4–7].

Алгоритмы порогового разделения секрета встречаются, например, в [8].

Актуальность данной статьи определяется необходимостью оценить сложность построенной криптосистемы в [1], что, в свою очередь, позволит выяснить, является ли данная система потенциально привлекательной для использования на практике.

Постановка задачи. Авторы ставят задачу описания формальных алгоритмов, необходимых для реализации метода разделения секрета, представленного в [1]. Кроме того, будет дана временная оценка сложности описанных алгоритмов.

Основная часть. Предположим, администратор сгенерировал некоторый секретный ключ. На основе секрета ему необходимо создать секретные доли, которые будут распределены между участниками. Поскольку секрет является элементом некоторого кольца вычетов по простому модулю, то сначала необходимо построить инъективное отображение из этого кольца в проективное пространство над конечным полем определенной размерности. Сопоставив секрету точку проективного пространства, администратор строит некоторую проективную прямую, проходящую через эту точку. Данная прямая публикуется. Затем администратор строит проективное подпространство, которое пересекает известную прямую ровно в одной точке, причем это та самая точка, которая соответствует секрету. Размерность построенного подпространства равна количеству участников в команде проверяющих минус один. Далее в рассматриваемом проективном подпространстве выделяется система проективно независимых точек, причем их количество совпадает с количеством проверяющих, и они порождают данное подпространство. Именно эти проективно независимые точки служат долями секрета. Для восстановления секрета проверяющие должны построить проективное подпространство, найдя прямую сумму своих секретных долей, и пересечь его с известной проективной прямой. Итак, найдена точка, соответствующая секрету. При помощи левого обратного отображения к построенной инъекции находится сам секрет.

Корректность нижеследующих алгоритмов обсуждается в статье [1]. Приведенные результаты описывают генерацию секретных долей для одной команды проверяющих. Последующее восстановление секретного ключа описано также только для одной команды. Для остальных команд проводятся аналогичные действия.

Обозначим N множество натуральных чисел. Далее везде $1 < t$, $t \in \mathrm{N}$ — число проверяющих, входящих в одну команду, $p < w^{m+1}$, где p — простое число, w — положительная степень некоторого простого числа, $m \in \mathrm{N}$: $t \le m$.

Обозначим $PG(m,w)$ проективное пространство над конечным полем F_w размерности m. Все точки $PG(m,w)$ представимы в виде $(\beta^i : \delta\beta^i : \ldots : \delta^{w-2}\beta^i)$, где $i \in \overline{0, n-1}$, $n = \frac{w^{m+1}-1}{w-1}$, δ — примитивный элемент поля F_w, β — примитивный элемент поля $F_{w^{m+1}}$ [1].

Обозначим VS^k структуру данных, которая хранит некоторым образом упорядоченные элементы векторного пространства F_w^k над полем F_w, $k \in \mathrm{N}$. Для данной функции g обозначение $O(g)$ означает множество функций — таких, что

$$O(g) = \{ f : \exists (C > 0), n_0 : \forall (n > n_0)\ 0 \le f(n) \le Cg(n) \},$$

где C, n_0 — положительные константы, O-нотация используется для оценки временной сложности алгоритмов [3].

Секрет, который разделяется между проверяющими, является случайно сгенерированным элементом мультипликативной группы кольца вычетов по простому модулю p, то есть $x \in \overline{1, p-1}$. Поэтому вначале построим инъективное отображение, сопоставляющее x некоторую точку $PG(m,w)$ конечной проективной геометрии над конечным полем F_w размерности m.

Как было установлено в [1], в состав публичного ключа входят: α — примитивный элемент поля Z_p, β — примитивный элемент поля $F_{w^{m+1}}$. Далее везде α и β несут такой смысл. Итак, можно полагать, что секретный ключ представим в виде $x = \alpha^i \in \mathrm{Z}_p^*$, где $i \in \overline{0, p-2}$.

Пусть $F_q = F_w[x]/(f)$ — произвольное конечное поле, $q = w^e$ — положительная степень некоторого простого числа w, $e \in N$, $f \in F_w[x]$ — примитивный многочлен. Каждый элемент F_q представим в виде полинома, принадлежащего $F_w[x]$, степень которого не превосходит $e \in N$. Тогда для сложения и вычитания двух элементов поля F_q используется $A(q) = O(\log_2 q)$ бит операций. В качестве алгоритма умножения в конечном поле F_q будем использовать алгоритм Карацубы [9]. Итак, временная сложность операции умножения двух полиномов из F_q равна $O\left((e \log_2 q)^{\log_2 3}\right)$. Результат умножения необходимо поделить на примитивный многочлен $f \in F_w[x]$. Временная сложность операции деления равна $O\left(e(e \log_2 q)^{\log_2 3}\right) = O\left(e^{1+\log_2 3}(\log_2 q)^{\log_2 3}\right)$. Итак, окончательно можно положить, что временная сложность умножения в конечном поле F_q равна $M(q) = M(w^e) = O\left(e^{1+\log_2 3}(\log_2 q)^{\log_2 3}\right)$. Для быстрого возведения в степень в конечном поле F_q используется схема «слева направо», описанная в [10], временная сложность которой равна

$$ME(q) = O\left(M(q)\log_2 q\right) = O\left((e^2 \log_2 w)^{1+\log_2 3}\right).$$

Сопоставим секрету $x \in Z_p^*$ некоторый элемент конечного поля — так, чтобы его можно было в дальнейшем восстановить. Следующий формальный алгоритм описывает один из возможных способов построить инъективное отображение $\mu : \mathrm{Z}_p^* \to F_{w^{m+1}}^*$. Найдем $\mu(x)$, где $x \in \mathrm{Z}_p^*$.

Алгоритм 1. Построение $\mu : \mathrm{Z}_p^* \to F_{w^{m+1}}^*$.

$FirstMapping\left(\beta : F_{w^{m+1}}^* = <\beta>, i \in \overline{0, p-2} : x = \alpha^i \in \mathrm{Z}_p^*\right)$

1. $\mu(x) \leftarrow \beta^i$;
2. *return* $\mu(x)$.

Лемма 1. Алгоритм 1 нахождения значения отображения μ имеет временную сложность $O\left(((m+1)^2 \log_2 w)^{1+\log_2 3}\right)$.

Далее сопоставим элементы конечного поля точкам проективного пространства. Найдем результат действия сюръекции $\tau : F_{w^{m+1}}^* \to PG(m,w)$, $\tau(y)$, где $y \in F_{w^{m+1}}^*$.

Алгоритм 2. Построение $\tau : F_{w^{m+1}}^* \to PG(m,w)$.

$SecondMapping\left(\beta : F_{w^{m+1}}^* = <\beta>, m, w, k \in \overline{0, w^{m+1}-2} : y = \beta^k \in F_{w^{m+1}}^*\right)$

1. $n \leftarrow \dfrac{w^{m+1}-1}{w-1}$;
2. $r \leftarrow k(\mathrm{mod}\, n)$;
3. $\tau(y) \leftarrow (\beta^r)$;
4. $return\ \tau(y)$.

Лемма 2. Алгоритм 2 нахождения значения отображения τ имеет временную сложность $O\left(((m+1)^2 \log_2 w)^{1+\log_2 3}\right)$.

Доказательство. Шаг 1 выполняется за время $O\left(\log_2(m+1)\cdot\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right)$, так как временная сложность двух вычитаний, одного деления и возведения в степень при работе с целыми числами равна

$$O\left(\log_2 w^{m+1} + \log_2 w + \left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3} + \log_2(m+1)\cdot\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right) =$$

$$= O\left(\log_2(m+1)\cdot\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right).$$

Шаг 2 выполняется за время $O\left(\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right)$, а шаг 3 — за время $ME(w^{m+1})$. Таким образом, получаем оценку

$$O\left(\log_2(m+1)\cdot\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right) + O\left(\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right) + O\left(((m+1)^2 \log_2 w)^{1+\log_2 3}\right) =$$

$$= O\left(((m+1)^2 \log_2 w)^{1+\log_2 3}\right) = ME(w^{m+1}).$$

Опишем инъективное отображение $\varphi : Z_p^* \to PG(m,w)\times F_w^*$, при помощи которого секретному ключу сопоставляется пара, состоящая из точки проективного пространства $PG(m,w)$ над полем F_w и элемента F_w^*, необходимого для построения левого обратного отображения к φ. Найдем $\varphi(x)$, где $x \in Z_p^*$.

Алгоритм 3. Построение $\varphi : Z_p^* \to PG(m,w)\times F_w^*$.

$ThirdMapping\,(\beta : F_{w^{m+1}}^* =<\beta>, m, w, i \in \overline{0, p-2} : x = \alpha^i \in Z_p^*)$

1. $\tau(\mu(x)) \leftarrow SecondMapping(\beta, m, w, i)$; // $\mu(x) = \beta^i$;
2. $n \leftarrow \dfrac{w^{m+1}-1}{w-1}$;
3. $k \leftarrow i - i(\mathrm{mod}\, n)$;
4. вычислить $\beta^k \in F_{w^{m+1}}^*$;
5. $\varphi(x) \leftarrow \left(\tau(\mu(x)), \beta^k\right)$;
6. $return\ \varphi(x)$.

Лемма 3. Алгоритм 3 нахождения значения отображения φ имеет временную сложность $O\left(((m+1)^2 \log_2 w)^{1+\log_2 3}\right)$.

Доказательство. Из леммы 2 следует, что шаг 1 выполняется за время $ME(w^{m+1})$, шаг 2 — $O\left(\log_2(m+1)\cdot\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right)$. На шаге 3 выполняется одно деление и одно вычитание целых чисел; время выполнения данных операций равно $O\left(\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3} + \log_2 w^{m+1}\right) = O\left(\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right)$. Шаг 4 выполняется за время $ME(w^{m+1})$. Шаг 5 выполняется за константное время. Итак, временная сложность алгоритма равна

$$ME(w^{m+1}) + O\left(\log_2(m+1)\cdot\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right) + O\left(\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right) = ME(w^{m+1}).$$

Далее возникает необходимость в генерации попарно различных случайных точек проективного пространства $PG(m,w)$ над полем F_w. Опишем один из способов сгенерировать $t \in N$ попарно различных случайных точек, где $t \le n$, $n = \dfrac{w^{m+1}-1}{w-1}$. Обозначим через $random\left([0,a]\right)$, где $a \in N$, алгоритм, реализующий линейный конгруэнтный метод генерации псевдослучайных чисел [6], который подает на выход целое случайное число в промежутке $[0,a]$.

Алгоритм 4. Генерирование попарно различных случайных точек $PG(m,w)$.

$GeneratePoints\,(\beta : F^{*}_{w^{m+1}} = <\beta>, m, w, t)$

1. $n \leftarrow \dfrac{w^{m+1}-1}{w-1}$;
2. $Powers \leftarrow \varnothing$;
3. $for\ \ (i \leftarrow 0; i < t; i++)\ \ \{$
4. $do\ \{$
5. $temp \leftarrow random\left([0, n-1]\right)$;
6. $\}\ while(temp \in Powers)$;
7. $Powers[i] \leftarrow temp$;
8. $\}$
9. $Points \leftarrow \varnothing$;
10. $for\ \ (i \leftarrow 0; i < t; i++)\ \ \{$
11. $Points[i] \leftarrow SecondMapping\,(\beta, m, w, Powers[i]);\ \}$
12. *return Points.*

Лемма 4. Алгоритм 4 генерирования попарно различных случайных точек $PG(m,w)$ имеет временную сложность $O(t^3)ME(w^{m+1})$.

Доказательство. Шаг 1 выполняется за время $O\left(\log_2(m+1)\cdot\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right)$. Шаг 2 выполняется за константное время. Шаг 5 выполняется за время $O(1)$, шаг 6 — $O(t)$, цикл в строках 4–6 — $O(t^2)$. Шаг 7 выполняется за константное время. Итак, цикл в строках 3–8 выполняется за $O(t^3)$. Шаг 9 выполняется за константное время. Цикл в строках 10–11 выполняется за время $O(t)ME(w^{m+1})$. Таким образом, временная сложность алгоритма равна

$$O\left(\log_2(m+1)\cdot\left(\log_2 w^{m+1}\right)^{\log_2 3}\right) + O(t^3) + O(t)ME(w^{m+1}) = O(t^3)ME(w^{m+1}).$$

Опишем построение правого обратного отображения к сюръекции τ: $\tau^{-1} : PG(m,w) \to F^{*}_{w^{m+1}}$. Найдем $\tau^{-1}\left((y)\right)$, где $(y) \in PG(m,w)$. Здесь $n = \dfrac{w^{m+1}-1}{w-1}$.

Алгоритм 5. Построение $\tau^{-1} : PG(m,w) \to F^{*}_{w^{m+1}}$.

$InvSecMap\left(\beta : F^{*}_{w^{m+1}} = <\beta>, k \in \overline{0, n-1} : (y) = (\beta^k) \in PG(m,w)\right)$

1. $\tau^{-1}\left((y)\right) \leftarrow \beta^k$;
2. $return\ \ \tau^{-1}(x)$.

Лемма 5. Алгоритм 5 построения отображения τ^{-1} имеет вычислительную сложность $O\left(((m+1)^2 \log_2 w)^{1+\log_2 3}\right)$.

Доказательство. Шаг 1 выполняется за время $ME(w^{m+1})$.

Для восстановления секрета используется проективная прямая $l \subset PG(m,w)$, содержащая секретную точку. Данная прямая является частью публичного ключа. Опишем работу алгоритма 6 *LineConstruc-*

$tion\left(VS^2, \beta: F^*_{w^{m+1}} = <\beta>, m, w, (x) = (\beta^k) \in PG(m,w)\right)$ построения проективной прямой $l \subset PG(m,w)$, которая содержит заданную точку $(x) = (\beta^k) \in PG(m,w)$, $k \in \overline{0, n-1}$, $n = \dfrac{w^{m+1}-1}{w-1}$.

Алгоритм 6. Построение проективной прямой $l \subset PG(m,w)$.

$LineConstruction\left(VS^2, \beta: F^*_{w^{m+1}} = <\beta>, m, w, (x) = (\beta^k) \in PG(m,w)\right)$

1. *do* {
2. $(y) = (\beta^v) \leftarrow GeneratePoints(\beta, m, w, 1)$;
3. } *while* $((x) = (y))$;
4. $l \leftarrow \varnothing$;
5. *for* $(i \leftarrow 0; i < w^2; i++)$ {
6. $temp \leftarrow VS^2[i][0] \cdot InvSecMap(\beta, k) + VS^2[i][1] \cdot InvSecMap(\beta, v)$;
7. $newPoint \leftarrow SecondMapping(\beta, m, w, z)$; //$temp = \beta^z$, $z \in \overline{0, w^{m+1}-2}$
8. $l \leftarrow l \cup \{\text{newPoint}\}$;
9. }
10. *return* l.

Лемма 6. Алгоритм 6 построения проективной прямой $l \subset PG(m,w)$ имеет временную сложность $O(w^3)ME(w^{m+1})$.

Опишем один из возможных способов создания проективного подпространства $M \subset PG(m,w)$ размерности $t-1 \in \overline{0,m}$, которое содержит произвольную, но зафиксированную точку $(x) = (\beta^k) \in PG(m,w)$, $k \in \overline{0, n-1}$, $n = \dfrac{w^{m+1}-1}{w-1}$. Умение строить такие проективные подпространства необходимо для генерации секретных долей.

Алгоритм 7. Построение проективного подпространства $M \subset PG(m,w)$ **размерности** $t-1$.

$SubspaceConstruction\left(VS^t, \beta: F^*_{w^{m+1}} = <\beta>, m, w, t, (x) = (\beta^k) \in PG(m,w)\right)$

1. $Points \leftarrow GeneratePoints(\beta, m, w, t)$;
2. *if* $((x) \notin Points)$;
3. $Points[0] \leftarrow (x)$;
4. $M \leftarrow \varnothing$;
5. *for* $(i \leftarrow 0; i < w^t; i++)$ {
6. $temp \leftarrow 0$;
7. *for* $(j \leftarrow 0; j < t; j++)$ {
8. $temp \leftarrow temp + VS^t[i][j] \cdot InvSecMap(\beta, Points[j])$; }
9. $M \leftarrow M \cup \{SecondMapping(\beta, m, w, z)\}$; //$temp = \beta^z$, $z \in \overline{0, w^{m+1}-2}$
10. }
11. *return M.*

Лемма 7. Алгоритм 7 построения проективного подпространства $M \subset PG(m,w)$ размерности $t-1$ имеет временную сложность $O(t^3 + tw^{2t})ME(w^{m+1})$.

Доказательство. Согласно лемме 4 шаг 1 выполняется за время $O(t^3)ME(w^{m+1})$. Цикл в строках 2–3 выполняется за время $O\left(\dfrac{w^t-1}{w-1}\right) = O(w^t)$. Шаги 4 и 6 выполняются за константное время. Согласно лемме 5 шаг 8 выполняется за время $ME(w^{m+1}) + M(w^{m+1}) + A(w^{m+1}) = ME(w^{m+1})$. Итак, цикл в строках 7–8 выполняется за время

$O(t)ME(w^{m+1})$. Согласно лемме 2 шаг 9 выполняется за время $O\left(\frac{w^t-1}{w-1}\right)+ME(w^{m+1})=O(w^t)+ME(w^{m+1})$, так как $M\subset PG(m,w)$ содержит $\frac{w^t-1}{w-1}$ точек. Таким образом, цикл в строках 5–10 выполняется за время

$$O(tw^t)ME(w^{m+1})+O(w^{2t})+O(w^t)ME(w^{m+1})=O(tw^{2t})ME(w^{m+1}).$$

Итак, временная сложность алгоритма равна

$$O(t^3)ME(w^{m+1})+O(w^t)+O(tw^{2t})ME(w^{m+1})=O(t^3+tw^{2t})ME(w^{m+1}).$$

Легко проверить, что количество проективных подпространств размерности $d\in\overline{0,m}$ в $PG(m,w)$ равно $[d]_w^m=\frac{\left(w^{m+1}-1\right)\left(w^m-1\right)\ldots\left(w^{m-d+1}-1\right)}{\left(w^{d+1}-1\right)\left(w^d-1\right)\ldots\left(w-1\right)}$.

Опишем способ построения проективного подпространства $M\subset PG(m,w)$ размерности $t-1\in\overline{0,m}$: $M\cap l=(x)$, где $l\subset PG(m,w)$ — проективная прямая, (x) — произвольная, но зафиксированная точка, принадлежащая l.

Легко проверить, что количество проективных подпространств размерности $d\in\overline{0,m}$ в $PG(m,w)$ равно

$$[d]_w^m=\frac{\left(w^{m+1}-1\right)\left(w^m-1\right)\ldots\left(w^{m-d+1}-1\right)}{\left(w^{d+1}-1\right)\left(w^d-1\right)\ldots\left(w-1\right)}.$$

Алгоритм 8. Построение проективного подпространства $M\subset PG(m,w)$ **размерности** $t-1$: $M\cap l=(x)$.

GenerateSpecialSubspace $(VS^t,\beta:F^*_{w^{m+1}}=<\beta>,m,w,t,l,(x)\in l)$

1. *while* (*true*) {
2. $M\leftarrow$ *SubspaceConstruction* $(VS^t,\beta,m,w,t,(x))$;
3. *intersection* $\leftarrow M\cap l$;
4. *if* (*intersection* $=\{(x)\}$);
5. *break*;
6. }
7. *return M*.

Легко увидеть, что верна лемма 8.

Лемма 8. Алгоритм 8 построения проективного подпространства $M\subset PG(m,w)$ размерности $t-1$: $M\cap l=(x)$, где $l\subset PG(m,w)$ — проективная прямая — такая, что $(x)\in l$, имеет временную сложность $O\left([t-1]_w^m(t^3+tw^{2t})\right)ME(w^{m+1})$.

Под проективным базисом проективного подпространства $M\subset PG(m,w)$ будем понимать проективно независимые точки M — такие, что их прямая сумма порождает *M*. Опишем один из способов построения проективного базиса проективного подпространства $M\subset PG(m,w)$ размерности $t-1\in\overline{0,m}$, который не содержит произвольную, но зафиксированную точку $(x)\in M$.

Алгоритм 9. Построение проективного базиса проективного подпространства $M\subset PG(m,w)$ **размерности** $t-1$.

GenerateSubspaceBasisSet $\left(w,t,M,(x)\in M\right)$

1. $|M|\leftarrow\frac{w^t-1}{w-1}$;
2. *do* {
3. $T\leftarrow$ *выбрать* t *попарно различных точек, принадлежащих M*;
4. } *while* $\left((x)\in T\right)$;
5. *return T*.

Легко увидеть, что верна лемма 9.

Лемма 9. Алгоритм 9 построения проективного базиса проективного подпространства $M \subset PG(m,w)$ размерности $t-1$ имеет временную сложность $O\left(\left(\log_2 w^t\right)^{\log_2 3} + \binom{w^t}{t}\right)$.

Опишем процедуру создания и разделения секретных долей среди $t \in \overline{2,m}$ проверяющих на основе секрета $x = \alpha^k \in Z_p^*$, $k \in \overline{0, p-2}$.

Алгоритм 10. Генерация и разделение секретных долей.

$GenerateAndShareSecrets\left(VS^2, VS^t, \beta : F^*_{w^{m+1}} =< \beta >, m, w, t, k : x = \alpha^k \in Z_p^*\right)$

1. $\varphi(x) = \left((y) = (\beta^i) \in PG(m,w), r \in F^*_{w^{m+1}}\right) \leftarrow ThirdMapping(\beta, m, w, k)$;
2. $l \leftarrow LineConstruction\left(VS^2, \beta, m, w, (y)\right)$;
3. $M \leftarrow GenerateSpecialSubspace\,(VS^t, \beta, m, w, t, l, (y))$;
4. $T \leftarrow GenerateSubspaceBasisSet\left(w, t, M, (y)\right)$;
5. *return T.*

Теорема 1. Алгоритм 10 генерации и раздачи секретных долей среди t проверяющих имеет временную сложность

$$O\left([t-1]_w^m (t^3 + tw^{2t})\right) ME(w^{m+1}) + O\left(\binom{w^t}{t}\right).$$

Доказательство. Результат следует из лемм 3, 6, 8 и 9, согласно которым временная сложность алгоритма равна

$$ME(w^{m+1}) + O(w^3) ME(w^{m+1}) + O\left([t-1]_w^m (t^3 + tw^{2t})\right) ME(w^{m+1}) +$$
$$+ O\left(\left(\log_2 w^t\right)^{\log_2 3} + \binom{w^t}{t}\right) = O\left([t-1]_w^m (t^3 + tw^{2t})\right) ME(w^{m+1}) + O\left(\binom{w^t}{t}\right).$$

Опишем формальный алгоритм восстановления проективного подпространства $M \subset PG(m,w)$ при наличии проективного базиса *T* этого подпространства.

Алгоритм 11. Построение проективного подпространства $M \subset PG(m,w)$ **размерности** $t-1$ **по проективному базису *T*** $M \subset PG(m,w)$.

$BasisSubspaceConstruction\left(VS^t, \beta : F^*_{w^{m+1}} =< \beta >, w, t, T\right)$

1. *for* $(i \leftarrow 0; i < w^t; i{+}{+})$ {
2. $temp \leftarrow 0$;
3. *for* $(j \leftarrow 0; j < t; j{+}{+})$ {
4. $temp \leftarrow temp + VS^t\,[i][j] \cdot InvSecMap\,(\beta, T[j])$; }
5. $M \leftarrow M \cup \{SecondMapping(\beta, m, w, z)\}$; $//temp = \beta^z$, $z \in \overline{0, w^{m+1}-2}$;
6. }
7. *return M.*

Легко увидеть, что верна лемма 10.

Лемма 10. Алгоритм 11 построения проективного подпространства $M \subset PG(m,w)$ размерности $t-1$ по базису *T* этого подпространства имеет временную сложность $O(tw^{2t}) \cdot ME(w^{m+1})$.

Опишем построение левого обратного отображения к инъекции μ: $\mu^{-1} : F^*_{w^{m+1}} \to Z_p^*$. Найдем $\mu^{-1}(y)$, где $y \in F^*_{w^{m+1}}$.

Алгоритм 12. Построение $\mu^{-1}: F^*_{w^{m+1}} \to Z^*_p$.

$InverseFirstMapping\left(\alpha : Z^*_p =<\alpha>, k \in \overline{0, p-2} : y = \beta^k \in F^*_{w^{m+1}}\right)$

1. $\mu^{-1}(x) \leftarrow \alpha^k$;
2. *return* $\mu^{-1}(x)$.

Лемма 11. Алгоритм 12 нахождения значения отображения μ^{-1} имеет временную сложность $O\left((\log_2 p)^{1+\log_2 3}\right)$.

Доказательство. Шаг 1 выполняется за время $ME(p)$.

Опишем построение левого обратного отображения к инъекции φ: $\varphi^{-1}: PG(m,w) \times F^*_w \to Z^*_p$. Найдем $\varphi^{-1}\left((y), s\right)$, где $(y) \in PG(m,w)$, $s \in F^*_w$.

Алгоритм 13. Построение $\varphi^{-1}: PG(m,w) \times F^*_w \to Z^*_p$.

$InverseThirdMapping\left(\alpha, v \in \overline{0, n-1} : (y) = (\beta^v), k \in \overline{0, w-2} : s = \beta^k\right)$

1. $i \leftarrow v + k$;
2. $\varphi^{-1}\left((y), s\right) \leftarrow InverseFirstMapping\left(\alpha, i\right)$;
3. *return* $\varphi^{-1}\left((y), s\right)$.

Лемма 12. Алгоритм 13 построения отображения φ^{-1} имеет временную сложность $O\left((\log_2 w^{m+1})^{1+\log_2 3}\right)$.

Доказательство. Шаг 1 выполняется за время $O\left(\log_2 w^{m+1}\right)$. Согласно лемме 11 шаг 2 выполняется за время $O\left((\log_2 p)^{1+\log_2 3}\right)$. Итак, временная сложность алгоритма равна $O\left(\log_2 w^{m+1} + (\log_2 p)^{1+\log_2 3}\right) = O\left((\log_2 w^{m+1})^{1+\log_2 3}\right)$, так как $p < w^{m+1}$.

Опишем процедуру восстановления секрета $x \in Z^*_p$, в которой участвуют $t \in \overline{2, m}$ проверяющих. Рассмотрим $\varphi^{-1}\left((x), s = \beta^k\right)$, где $(x) \in PG(m,w)$ — секретная точка, $s = \beta^k \in F^*_w$, $k \in \overline{0, w-2}$.

В [1] установлено, что $s \in F^*_w$ является частью публичного ключа, так же, как и проективная прямая $l \subset PG(m,w)$, содержащая секретную точку. Напомним, что T — множество секретных долей.

Алгоритм 14. Восстановление секрета.

$RevealSecret\left(VS^t, \alpha : Z^*_p =<\alpha>, \beta : F^*_{w^{m+1}} =<\beta>, w, t, T, l, k \in \overline{0, w-2} : s = \beta^k\right)$

1. $M \leftarrow BasisSubspaceConstruction\left(VS^t, \beta, w, t, T\right)$;
2. $(x) \leftarrow M \cap l$;
3. $x \leftarrow InverseThirdMapping\left(\alpha, v \in \overline{0, (w^{m+1}-1)/(w-1)-1} : (x) = (\beta^v), k\right)$;
4. *return* x.

Теорема 2. Временная сложность алгоритма восстановления секрета равна $O(tw^{2t}) \cdot ME(w^{m+1})$.

Доказательство. Согласно лемме 10 шаг 1 выполняется за время $O(tw^{2t}) \cdot ME(w^{m+1})$. Поскольку M является проективным подпространством $PG(m,w)$ размерности $t-1$, то оно содержит $\frac{w^t - 1}{w-1}$ точек. Проективная прямая $l \subset PG(m,w)$ содержит $w+1$ точек. Итак, действуя методом полного перебора, можно найти пересечение на шаге 2 за время $O\left(\left(\frac{w^t-1}{w-1}\right)^2\right) = O\left(w^{2t}\right)$. Согласно лемме 12 шаг 3 выполняется за время $O\left((\log_2 w^{m+1})^{1+\log_2 3}\right)$. Таким образом, временная сложность алгоритма равна

$$O(tw^{2t})\cdot ME(w^{m+1})+O\left(w^{2t}\right)+O\left((\log_2 w^{m+1})^{1+\log_2 3}\right)=O(tw^{2t})\cdot ME(w^{m+1}).$$

Выводы. В данной работе построены формальные алгоритмы, необходимые для реализации метода порогового разделения секрета, применяемого для проведения электронного голосования. Также приведена временная сложность построенных методов. Наглядно продемонстрировано, что описанная криптосистема представляет собой полиномиальный детерминированный алгоритм. Подходящим выбором начальных параметров системы будут задание большой размерности проективного пространства и конечного поля, над которым оно задано, а также порядка мультипликативной группы, где лежит секрет. При таком выборе начальных параметров можно утверждать, что разработанные криптографические методы надежны, т. е. их применение гарантирует с высокой вероятностью проведение честных и независимых электронных выборов.

Библиографический список

1. Архангельская, Н. С. Математическая модель электронного голосования на основе методов пороговой криптографии [Электронный ресурс] / Н. С. Архангельская, А. В. Мазуренко // Системный анализ, управление и обработка информации : сб. тр. VI междунар. семинара. — Ростов-на-Дону, 2015. — Т. 1. — С. 275–280. — Режим доступа: http://ntb.donstu.ru/content/2015421/ (дата обращения: 16.10.16).

2. ElGamal, T. A public-key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms / T. ElGamal // IEEE Transactions on Information Theory. — 1985. — Vol. 31, № 4. — P. 469–472.

3. Основы криптографии / А. П. Алферов [и др.]. — Москва : Гелиос-АРВ, 2001. — 480 с.

4. A heuristic quasi-polynomial algorithm for discrete logarithm in finite fields of small characteristic / R. Barbulescu [et al.] // Advances in Cryptology — EUROCRYPT 2014 : Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques. — 2014. — Vol. 8441. — P. 1–16.

5. Stallings, W. Computer security: principles and practice / W. Stallings. — Boston : Pearson, 2012. — 182 p.

6. Рябко, Б. Я. Криптографические методы защиты информации / Б. Я. Рябко, А. Н. Фионов. — Москва : Горячая линия — Телеком, 2005. — 229 с.

7. Joux, A. The past, evolving present and future of discrete logarithm / A. Joux, A.-M. Odlyzko, C. Pierrot // Open Problems in Mathematics and Computational Science. — Cham : Springer, 2014. — P. 5–36.

8. Могилевская, Н. С. Пороговое разделение файлов на основе битовых масок: идея и возможное применение / Н. С. Могилевская, Р. В. Кульбикаян, Л. А. Журавлев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 10. — С. 1749–1755.

9. Fast Integer Multiplication Using Modular Arithmetic / De Anindya [et al.] // SIAM Journal on Computing. — 2013. — Vol. 42, № 2. — P. 685–699.

10. Schneier, B. Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C / B. Schneier. — 2nd Edition. — New York : John Wiley & Sons, 1995. — 792 p.

References

1. Arkhangelskaya, N.S., Mazurenko, A.V. Matematicheskaya model' elektronnogo golosovaniya na osnove metodov porogovoy kriptografii. [Mathematical model of electronic voting based on threshold cryptography methods.] Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii: sb. tr. VI mezhdunar. seminara. [System analysis, control and information processing: Proc. VI Int. Workshop.] Rostov-on-Don, 2015, vol. 1, pp. 275–280. Available at: http://ntb.donstu.ru/content/2015421/ (accessed: 16.10.16) (in Russian).

2. ElGamal, T. A public-key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms. IEEE Transactions on Information Theory, 1985, vol. 31, no. 4, pp. 469–472.

3. Alferov, A.P., et al. Osnovy kriptografii. [Cryptography fundamentals.] Moscow: Gelios-ARV, 2001, 480 p. (in Russian).

4. Barbulescu, R., et al. A heuristic quasi-polynomial algorithm for discrete logarithm in finite fields of small characteristic. Advances in Cryptology — EUROCRYPT 2014: Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques. 2014, vol. 8441, pp. 1–16.

5. Stallings, W. Computer security: principles and practice. Boston: Pearson, 2012, 182 p.

6. Ryabko, B.Y., Fionov, A.N. Kriptograficheskie metody zashchity informatsii. [Cryptographic methods of information security.] Moscow: Hot Line — Telecom, 2005, 229 p. (in Russian).

7. Joux, A., Odlyzko, A.-M., Pierrot, C. The past, evolving present and future of discrete logarithm. Open Problems in Mathematics and Computational Science. Cham: Springer, 2014, pp. 5–36.

8. Mogilevskaya, N.S., Kulbikayan, R.V., Zhuravlev, L.A. Porogovoe razdelenie faylov na osnove bitovykh masok: ideya i vozmozhnoe primenenie. [Threshold separation of files based on bit masks: idea and potential application.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 10, pp. 1749–1755 (in Russian).

9. De Anindya, et al. Fast Integer Multiplication Using Modular Arithmetic. SIAM Journal on Computing, 2013, vol. 42, no. 2, pp. 685–699.

10. Schneier, B. Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995, 792 p.

Поступила в редакцию 22.03.2017
Сдана в редакцию 29.03.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 22.03.2017
Submitted 29.03.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Черкесова Лариса Владимировна,
профессор кафедр «Математика и информатика» и «Кибербезопасность информационных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г Ростов-на-Дону, пл.Гагарина,1), доктор физико-математических наук, кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9392-3140
chia2002@inbox.ru

Сафарьян Ольга Александровна,
старший преподаватель кафедры «Кибербезопасность информационных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г Ростов-на-Дону, пл.Гагарина,1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7508-913X
safari_2006@mail.ru

Мазуренко Александр Вадимович,
студент кафедры «Кибербезопасность информационных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9541-3374
mazurencoal@gmail.com

Архангельская Надежда Сергеевна,
студентка кафедры «Кибербезопасность информационных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1678-2038
arh.iv@bk.ru

Authors:

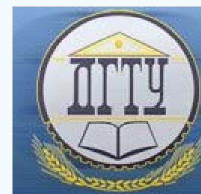
Cherkesova, Larisa V.,
professor of the Mathematics and Computer Sciences, and Cybersecurity of IT Systems Departments, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9392-3140
chia2002@inbox.ru

Safaryan, Olga A.,
senior lecturer of the Cybersecurity of IT Systems Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7508-913X
safari_2006@mail.ru

Mazurenko, Alexander V.,
student of the Cybersecurity of IT Systems Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9541-3374
mazurencoal@gmail.com

Arhangelskaya, Nadezhda S.,
student of the Cybersecurity of IT Systems Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1678-2038
arh.iv@bk.ru

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 621.928.93 10.23947/1992-5980-2017-17-3-156-165

Сравнительный анализ аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей при проведении параллельных сравнительных испытаний*

Н. Н. Азимова[1], Ю. И. Булыгин[2], И. С. Купцова[3]**
[1, 2, 3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Comparative analysis of aerodynamic characteristics of centrifugal dust collectors under parallel comparison testing***

N. N. Azimova[1], Yu. I. Bulygin[2], I. S. Kuptsova[3]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена исследованиям на полупромышленной экспериментальной установке «Циклон», которая позволяет проводить параллельные сравнительные аэродинамические испытания цилиндрического циклона с улиткой «ЦН-15у-300» и запатентованного циклона с обратным конусом «ЦОК-200-300». Цель работы — экспериментальное получение основных аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей разной формы без бункеров при проведении параллельных сравнительных испытаний с последующим анализом полученных экспериментальных результатов. Важной научно-технической задачей является повышение эффективности, увеличение производительности при одновременном снижении энергозатрат на вентиляционные системы и металлоемкости пылеуловителей центробежного действия.

Материалы и методы. Проведены параллельные сравнительные аэродинамические испытания центробежных пылеуловителей разной формы цилиндрического циклона с улиткой «ЦН-15у-300» и запатентованного циклона с обратным конусом «ЦОК-200-300». При этом использованы пневмометрические трубки Пито и два высокоточных дифференциальных манометра *Testo*-521. Проведены математические расчеты коэффициентов гидравлического сопротивления исследуемых аппаратов

Результаты исследования. В результате экспериментов выявлен характер изменения полных давлений и скорости движения воздуха в различных измерительных точках входных и выходных сечений патрубков циклонных аппаратов при разной производительности вытяжного вентилятора. Рассчитанные коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) аппарата «ЦОК-200-300» оказались в 2–2,2 раза меньше КГС «ЦН-15у-300» за счет более высокой скорости потока в теле аппарата, что говорит о его лучших аэродинамических характеристиках и возможно более высокой эффективности пылеулавливания за счет высокой степени турбулизации потоков.

Обсуждение и заключения. Полученные при испытаниях аэродинамические характеристики применяются в процессе эксплуатации для оценки эффективности и экономической выгоды использования циклонного аппарата. Для проверки

Introduction. The article is devoted to investigations on the “Cyclone” semi-industrial pilot plant which allows for parallel comparative aerodynamic testing of the cylindrical cyclone with “TsN-15u-300” volute and the patented cyclone with the “CSC-200-300” inverted cone. The work objective is to obtain experimentally major aerodynamic characteristics of the centrifugal dust collectors of various shapes without bunkers under the parallel comparative testing with the subsequent analysis of the results. Improving the efficiency, increasing the productivity while reducing the energy consumption for ventilation systems and metal consumption for centrifugal dust collectors, are crucial technological tasks.

Materials and Methods. Parallel comparative aerodynamic testing of centrifugal dust collectors of various shapes for the cylindrical cyclone with “TsN-15u-300” volute and the patented cyclone with the “CSC-200-300” inverted cone is conducted. At this, Pitot tubes and two high-precision *Testo*-521 differential pressure gauges are used. Mathematical calculations of the hydraulic resistance coefficients for the investigated devices are made.

Research Results. As a result of the experiments, the behavior of the total pressures and air velocity at various gage points of the inlet and outlet nozzle sections of the cyclone apparatus at different capacities of the fan exhauster is specified. The calculated hydraulic resistance coefficients (HRC) of the “CSC-200-300” device appear 2–2.2 times lower than HRC of “TsN-15u-300” due to the higher flow velocity in the device body. This indicates its best aerodynamics and possibly higher efficiency of the dust collection due to the high flow turbulence.

Discussion and Conclusions. The obtained aerodynamic characteristics are used in operation to assess the effectiveness and

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: bulyur_rostov@mail.ru, arkomaazimov@ mail.ru, i-kyptsova@mail.ru
*** The work was performed as part of the initiative of the Scientific-research work.

полученных выводов необходимы дальнейшие экспериментальные исследования на полупромышленной установке.

economic benefits of the cyclone apparatus. Further experimental studies on the pilot plant are needed to verify the conclusions.

Ключевые слова: аэродинамика, эффективность, циклон, экспериментальная установка, конструктивные параметры.

Keywords: aerodynamics, efficiency, cyclone, pilot plant, design factors.

Образец для цитирования: Азимова, Н. Н. Сравнительный анализ аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей при проведении параллельных сравнительных испытаний / Н. Н. Азимова, Ю. И. Булыгин, И. С. Купцова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 156–165.

For citation: N.N. Azimova, Yu.I. Bulygin, I.S. Kuptsova. Comparative analysis of aerodynamic characteristics of centrifugal dust collectors under parallel comparison testing. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 156–165.

Введение. Снижение запыленности рабочих зон и защита окружающей среды от пылевых выбросов предприятий машиностроения остается актуальной задачей.

Наиболее широкое распространение в промышленности в качестве аппаратов пылеулавливания получили центробежные отделители пыли, главным образом циклоны.

Важной научно-технической задачей является повышение эффективности, увеличение производительности при одновременном снижении энергозатрат на вентиляционные системы и металлоемкости пылеуловителей центробежного действия.

В процессе эксплуатации для оценки эффективности и экономической выгоды использования циклонного аппарата применяются полученные при испытаниях аэродинамические характеристики циклонов и зависимость гидравлического сопротивления циклона от его производительности (расхода) газов.

На кафедре «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета в течение последних лет ведутся НИР, посвященные разработке и созданию усовершенствованных конструкций центробежных пылеуловителей разной формы, предусматривающих возможность регулирования их конструктивных параметров в зависимости от свойств и характеристик пылевоздушной среды [1–3]. Рассматриваемые в статье конструктивные решения защищены рядом патентов РФ [4–5].

Целью работы является экспериментальное получение основных аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей разной формы без бункеров при проведении параллельных сравнительных испытаний с последующим анализом полученных экспериментальных результатов. Поэтому данная статья является актуальной, особенно для последующего практического применения ее результатов в технике обеспыливания.

Постановка задачи исследования и требования к аэродинамическому эксперименту. Для решения поставленных задач были сформулированы требования к эксперименту:

— испытания проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 12.3.018-79 «Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний»;

— необходимо выявить характер изменения давления, скорости движения воздуха и его расхода в разных точках в сечениях входных и выходных патрубков циклонных аппаратов при различной задаваемой производительности вытяжного вентилятора [2–4];

— получить экспериментально полные, статические и динамические давления, скорость движения воздушного потока в разных точках по сечениям на входе и выходе циклонных аппаратов при различной задаваемой производительности вытяжного вентилятора;

— сравнить расчетные и экспериментально найденные коэффициенты гидравлического сопротивления исследуемых аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300».

Экспериментальная установка сконструирована таким образом, чтобы можно было параллельно исследовать циклонные аппараты различной формы (рис. 1) [5].

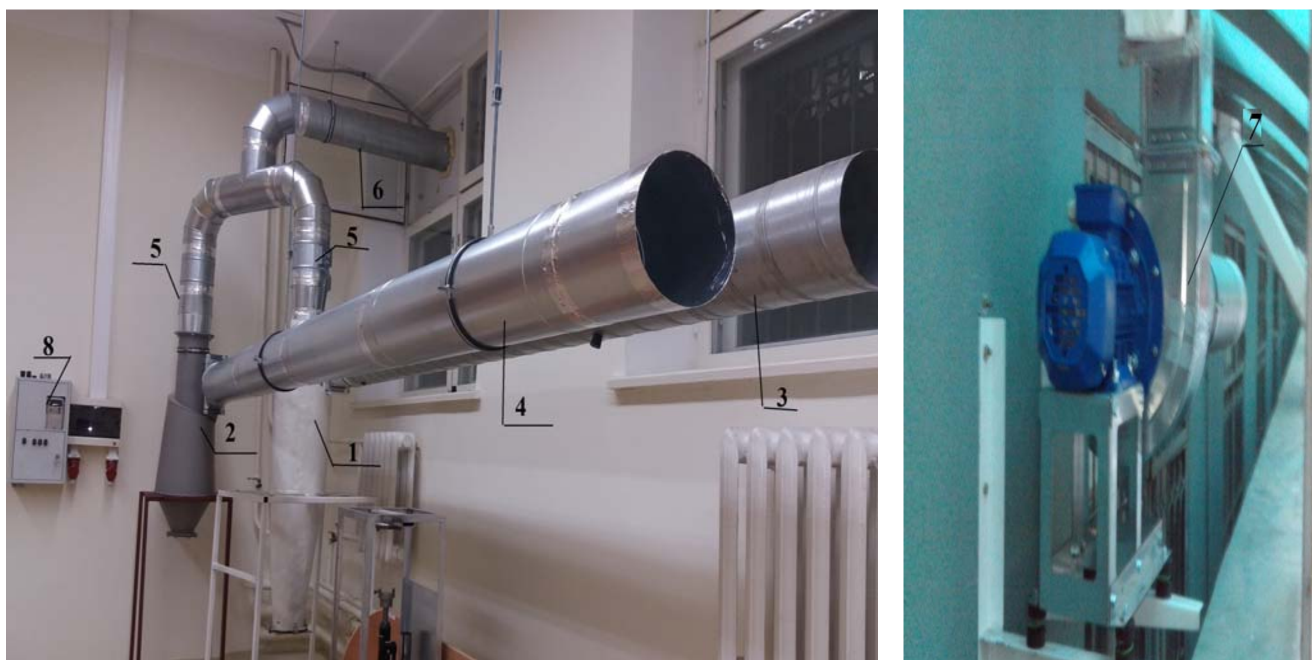


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — аппарат «Циклон ЦН15у-300»; 2 — аппарат «ЦОК-200-300»; 3 — входной патрубок «Циклон ЦН-15у-300»; 4 — входной патрубок «ЦОК»; 5 — закрываемая перегородка; 6 — выходной патрубок; 7 — радиальный вентилятор; 8 — электронный блок управления вентилятором

Fig. 1. Pilot plant: 1 — "Cyclone TsN15u-300" apparatus; 2 — "CSC -200-300" apparatus; 3 —inlet nozzle of "Cyclone TsN15u-300"; 4 — inlet nozzle of "CSC -200-300"; 5 — lockable baffle; 6 — outlet nozzle; 7 — radial fan; 8 — electronic fan control unit

Два аппарата «Циклон ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» с равными параметрами воздуховодов устанавливаются параллельно. Поочередно перекрываются перегородки в области входного патрубка с воздуховодом, подающим воздушный поток в циклонный аппарат, — и таким образом появляется возможность проводить испытания аппаратов с разными конструктивными особенностями, но с равными параметрами воздуховода. При этом не теряется время на смену аппаратов и не нарушается герметичность воздуховода. Измерения на аппаратах проводятся без бункеров, отверстия герметично закрыты.

Измерения давлений и скоростей воздуха осуществлялись при помощи двух пневмометрических трубок Пито и двух дифференциальных манометров *Testo*-521 (Германия), которые были установлены одновременно на входе и выходе исследуемых аппаратов [6].

Аэродинамические испытания полупромышленной установки. Для проведения измерения аэродинамических характеристик циклонных аппаратов была собрана схема, в которой использованы дифференциальные микроманометры *Testo* 521-1 с комплектом напорных трубок Пито.

Диапазон измерения скорости газового (воздушного) потока трубки Пито составляет 4–21 м/с. При измерении скоростей от 1,5 до 4 м/с и от 21 до 40 м/с погрешность не нормирована. Средний коэффициент преобразования динамического (скоростного) давления во всем диапазоне скоростей для напорной дифференциальной трубки Пито составляет 0,95–1,05. Предел допускаемой относительной погрешности определения коэффициента преобразования для всего диапазона скоростей для напорной дифференциальной трубки Пито не более ±3 % [7].

Дифференциальный манометр *Testo* 521-1. Движение воздушных потоков и изменение аэродинамических параметров внутри циклонного аппарата имеют более сложный вихревой характер, чем на входе и выходе из него. Для регистрации всех изменений использовался дифференциальный манометр *Testo* 521 со встроенным сенсором давления от 0 до 100 гПа и для измерения скорости потока в диапазоне от 5 до 100 м/с с применением трубки Пито. Модель *Testo* 521-1 имеет погрешность 0,2 % от полной шкалы. Погрешность при 5 м/с — 0,32 м/с. Погрешность при 20 м/с — 0,09 м/с. Погрешность при 50 м/с — 0,05 м/с.

При необходимости измерений скорости потока в диапазоне от 1 до 12 м/с можно проводить точные измерения с использованием внешнего зонда давления 100 Па. Зависимость от расположения полностью устранена благодаря

двойной мембране. Изменение месторасположения зонда не влияет на результаты измерений: погрешность при 1 м/с — 0,09 м/с; погрешность при 5–8 м/с — 0,03 м/с [8].

Прибор позволяет задавать время, промежуток, количество измерений, температуру, относительную влажность, абсолютное давление, поперечное сечение воздуховода, коэффициент компенсации, коэффициент трубки Пито и запустить автоматическое сохранение данных при проведении замеров. Прибор одновременно может сохранить во внутренней памяти 25000 измерений. Они могут быть переданы сразу в электронную вычислительную систему или на принтер.

Программный комплекс обеспечения взаимосвязи измерительных приборов с современными электронными вычислительными системами. Дифференциальный манометр соединялся с электронно-вычислительной системой по стандарту *RS*232. Считывание, обработку и выдачу результатов обеспечивал программный комплекс *Comfort Software* 3,4 (рис. 2). Он позволяет напрямую в режиме реального времени снимать измеряемые показатели и записывать их в тело программы [9].

Lenzkirc...	Date	Time	[%rH] rel. Feuchte in % r.F.	[°C] Temperatur in °C
1	23.08.2000	16:48:27	41,90	25,40
2	23.08.2000	16:48:29	41,90	25,40
3	23.08.2000	16:48:31	41,90	25,40
4	23.08.2000	16:48:33	41,90	25,40
5	23.08.2000	16:48:35	42,00	25,40
6	23.08.2000	16:48:37	42,00	25,40
7	23.08.2000	16:48:39	41,90	25,40
8	23.08.2000	16:48:41	41,80	25,40
9	23.08.2000	16:48:43	41,90	25,40
10	23.08.2000	16:48:45	42,00	25,40
11	23.08.2000	16:48:47	42,10	25,40
12	23.08.2000	16:48:49	42,10	25,50
13	23.08.2000	16:48:51	42,00	25,50
14	23.08.2000	16:48:53	42,00	25,50
15	23.08.2000	16:48:55	42,10	25,50
16	23.08.2000	16:48:57	42,10	25,50
17	23.08.2000	16:48:59	42,20	25,50
18	23.08.2000	16:49:01	42,20	25,50
19	23.08.2000	16:49:03	42,20	25,50
20	23.08.2000	16:49:05	42,10	25,50
21	23.08.2000	16:49:07	42,10	25,50
22	23.08.2000	16:49:09	42,10	25,50
23	23.08.2000	16:49:11	42,10	25,50
24	23.08.2000	16:49:13	42,10	25,50
25	23.08.2000	16:49:15	42,20	25,50
26	23.08.2000	16:49:17	42,10	25,50
27	23.08.2000	16:49:19	42,10	25,40

Рис. 2. Интерфейс программы *Comfort Software* 3,4

Fig. 2. Comfort Software 3,4 interface

В ходе экспериментов по изучению аэродинамических параметров циклонных аппаратов произведено более 1260 замеров, получено около 4000 значений данных. Без специального программного обеспечения и интерфейса взаимодействия измерительного прибора с электронно-вычислительной системой обработка такого массива данных была бы весьма затруднительна и привела бы к значительным погрешностям.

Эксперимент, проведенный на установке для сравнения аэродинамических характеристик циклонных аппаратов разной геометрической формы. Для измерения давлений и скоростей движения воздуха в воздуховодах (каналах) выбраны участки с расположением мерных сечений на расстояниях не менее шести гидравлических диаметров D_h (м) за местом возмущения потока (отводы, шиберы, диафрагмы и т. п.) и не менее двух гидравлических диаметров перед ним [10]. Координаты точек измерений давлений и скоростей (рис. 3), а также количество точек определяются формой и размерами мерного круглого сечения в соответствие с ГОСТ 12.3.018-79.

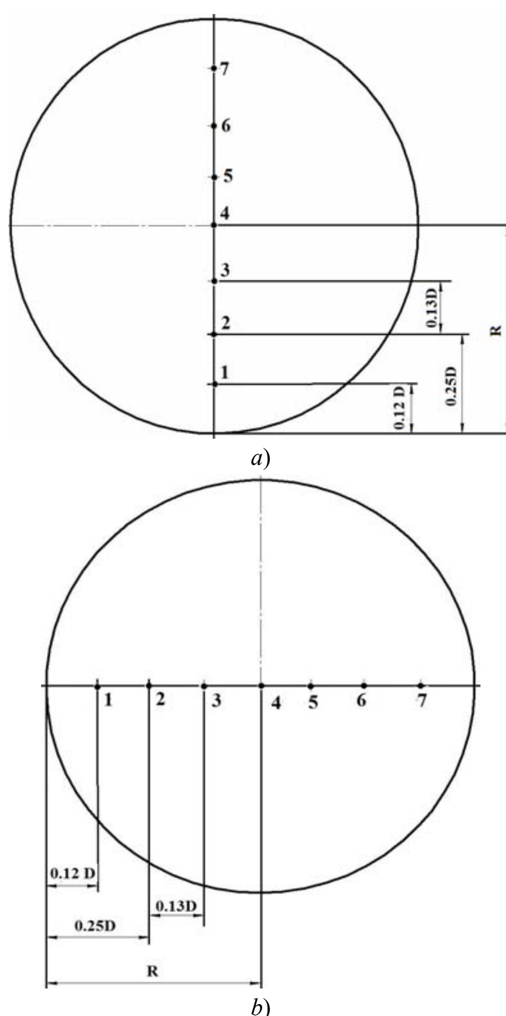


Рис. 3. Схема расположения точек измерения давлений и скоростей патрубка циклонов: входного (*a*), выходного (*b*)

Fig. 3. Layout chart of cyclone nozzle pressure and velocity gage points: inlet (a), outlet (b)

Диаметр патрубка исследуемых аппаратов составляет 200 мм, следовательно, основные точки измерения будут находиться на расстоянии 0,12*D* (1) от стенок патрубка и на расстоянии 0,5*D* (4). Для точности эксперимента были взяты еще четыре дополнительные точки, расположенные на расстоянии 0,25 *D* (2, 6) и 0,38 *D* (3, 5).

На входном и выходном патрубках экспериментальной установки были проделаны отверстия $D_{\text{ОТВ}} = 20$ мм. В этих отверстиях с помощью силиконовых пробок фиксировались трубки Пито, подключенные к двум дифференциальным манометрам *Testo* 521-1. Далее запускался в эксплуатацию радиальный вентилятор «РОВЕН *VCZpl*-250», работающий на вытяжку воздушного потока. С помощью электронного блока управления менялись режимы работы вентилятора. После 15-минутной работы вентилятора для полного установления ламинарного течения воздушного потока на входном и выходном патрубках установки проводились замеры полного, статического и динамического давления, расхода, скорости воздушного потока. Для объективности исследования замеры проводились 30 раз на трех разных режимах работы вентилятора (*n*1 = 1710 об/мин, *n*2 = 2250 об/мин, *n*3 = 2850 об/мин) в семи точках по сечениям на входе и выходе циклонных аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300». Работа вентилятора сопровождается следующими объемными расходами на входе:

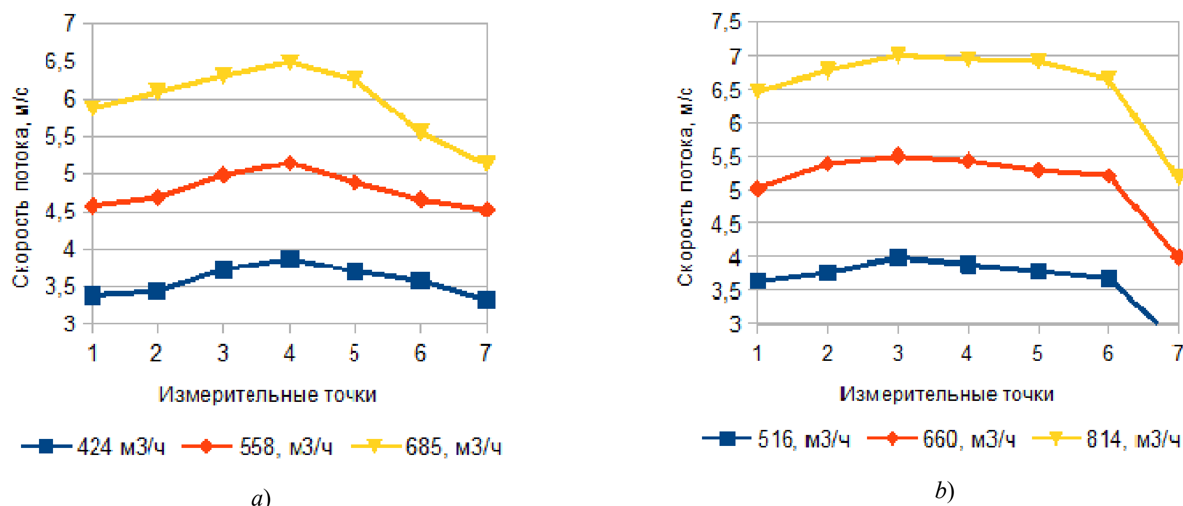
— «ЦН-15у-300»: *n*1 = 424 $м^3$/ч, *n*2 = 558 $м^3$/ч, *n*3 = 685 $м^3$/ч;
— «ЦОК-200-300»: *n*1 = 516 $м^3$/ч, *n*2 = 660 $м^3$/ч, *n*3 = 814 $м^3$/ч.

Экспериментальная часть и численные исследования. Полученные результаты в экспериментах были обработаны и представлены в виде графиков (рис. 4–9).

На рис. 4 показаны результаты измерений скоростей воздушного потока во входном патрубке аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» на разных режимах работы вентилятора.

Как видно из рис. 4, величины скорости во входном трапециевидном патрубке «ЦОК-200-300» несколько выше, чем на входе цилиндрического циклона, что обусловливает более высокое значение центробежной силы на первых витках траектории движения воздуха в аппарате.

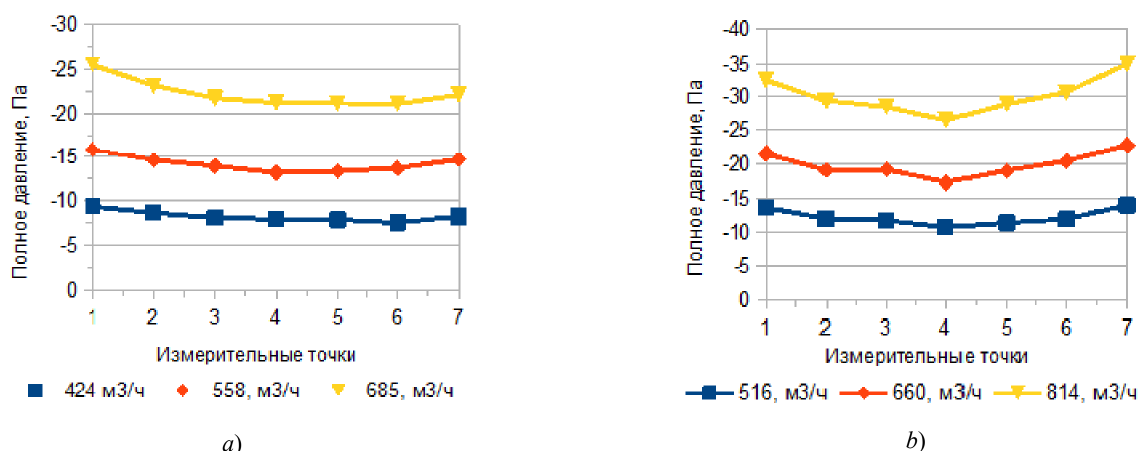
На рис. 5 и 6 показаны результаты измерений полных давлений воздушного потока во входном и выходном патрубках установки на разных режимах работы вентилятора.



а) *b*)

Рис. 4. Скорость воздушного потока при различных режимах работы вентилятора во входных патрубках циклонов «ЦН15у-300» (*а*) и «ЦОК-200-300» (*b*)

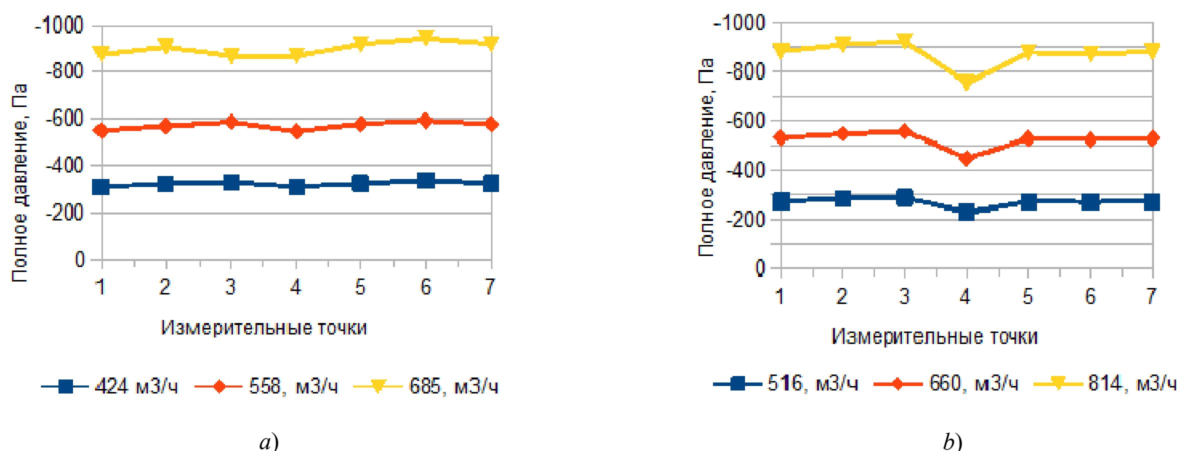
Fig. 4. Air flow velocity under various fan operating modes in inlet nozzles of "TsN15u-300" (a), and "CSC -200-300" cyclones (b)



а) *b*)

Рис. 5. Полное давление воздушного потока при различных режимах работы вентилятора во входных патрубках циклонов «ЦН15у-300» (*а*) и «ЦОК-200-300» (*b*)

Fig. 5. Total airflow pressure under various fan operating modes in inlet nozzles of "TsN15u-300" (a), and "CSC -200-300" cyclones (b)



а) *b*)

Рис. 6. Полное давление воздушного потока при различных режимах работы вентилятора на выходных патрубках циклонов «ЦН-15у-300» (*а*) и «ЦОК-200-300» (*b*)

Fig. 6. Total airflow pressure under various fan operating modes in outlet nozzles of "TsN15u-300" (a), and "CSC -200-300" cyclones (b)

Характер изменения полного давления показывает, что в выходном патрубке циклона образуется разряжение. Это объясняется тем, что исследуемые центробежные аппараты работают не на нагнетание, а на вытяжку (согласно схеме установки). Это явление объясняется вихреобразным потоком не только в теле аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300», но и на выходе установки. При этом давление распределяется по периферии вихря.

В циклонных аппаратах формируются сложные потоки, аэродинамические параметры которых (скорости, давления) непрерывно меняются. Для определения реальной скорости воздушного потока в теле циклонов используется формула:

$$V = \frac{Q}{0,785 \cdot 3600 D^2}, \qquad (1)$$

где 3600 — перевод Q в м/с; Q — объем воздушного потока, проходящего через циклон в зависимости от режима работы вентилятора, м/ч; D — диаметр циклона, м [11]

Результаты расчетов скорости потока в теле циклонов представлены в виде графиков (рис. 7).

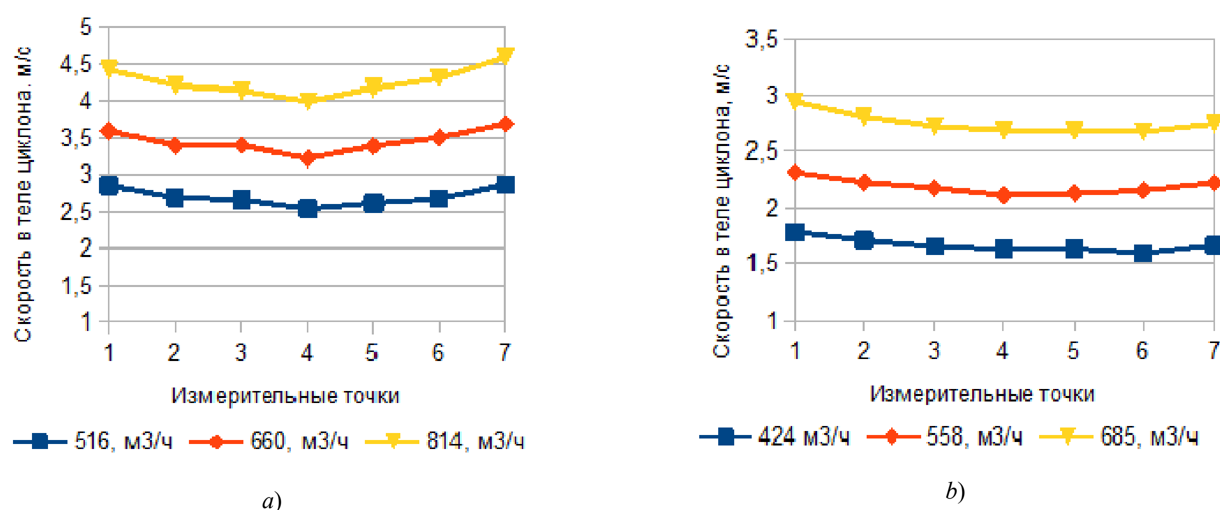


Рис. 7. Скорость воздушного потока при различных режимах работы вентилятора (при разной производительности) в теле циклонов «ЦН15у-300» (*a*) и «ЦОК-200-300» (*b*)

Fig. 7. Air flow velocity under various fan operating modes (under varying performance) in bodies of “TsN15u-300” (a), and “CSC -200-300” cyclones (b)

Результаты расчетных скоростей хорошо согласуются со значениями скоростей, представленными в литературных источниках, согласно которым скорость в теле циклона «ЦН-15у-300» равна 3,5 м/с, в циклоне «ЦОК» — 4,5 м/с [12].

Важным показателем определения коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) является перепад давления на входе и выходе в аппаратах «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» (рис. 8).

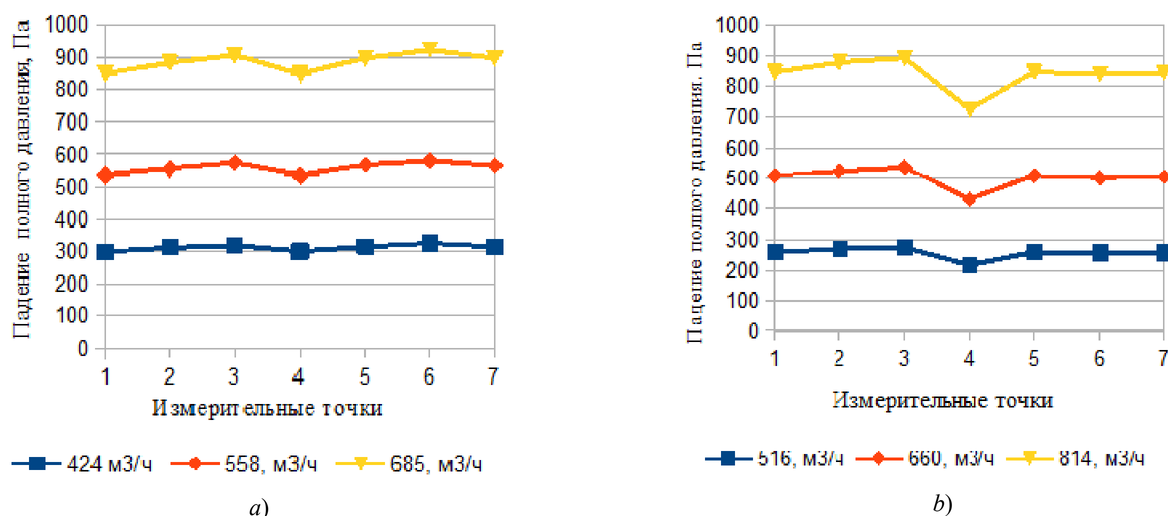


Рис. 8. Δ*P* полного давления воздушного потока при различных режимах работы вентилятора циклонов «ЦН-15у-300» (*a*) и «ЦОК-200-300» (*b*)

Fig. 8. ΔP of total airflow pressure under various fan operating modes of “TsN15u-300” (a), and “CSC -200-300” cyclones (b)

Как видно из рис. 8, перепады полных давлений на входе и выходе в исследуемых аппаратах «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» практически не отличаются. Однако с величинами КГС центробежных пылеуловителей все обстоит иначе.

Стоимость газоочистки является важнейшим показателем, т. к. характеризует ее экономичность. Она определяется главным образом капитальными затратами на оборудование и эксплуатационными расходами. Капитальные затраты зависят от конструктивных особенностей и установленных мощностей оборудования. Эксплуатационные расходы зависят в основном от расхода электрической энергии и определяются потребляемой мощностью циклона. Эта мощность зависит от гидравлического сопротивления циклона (потери давления в нем — ΔP).

Коэффициенты гидравлического сопротивления «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» вычисляются по формуле (2) и представлены на графиках (рис. 9):

$$\xi_{вх} = \frac{2\Delta P_{ц}}{\rho V_{вх}^{2}}, \qquad (2)$$

где: $\xi_{вх}$ — коэффициент гидравлического сопротивления циклона; $V_{вх}$ — скорость потока во входном патрубке, м/с; ΔP циклона — падение полного давления, Па; ρ — плотность воздушного потока.

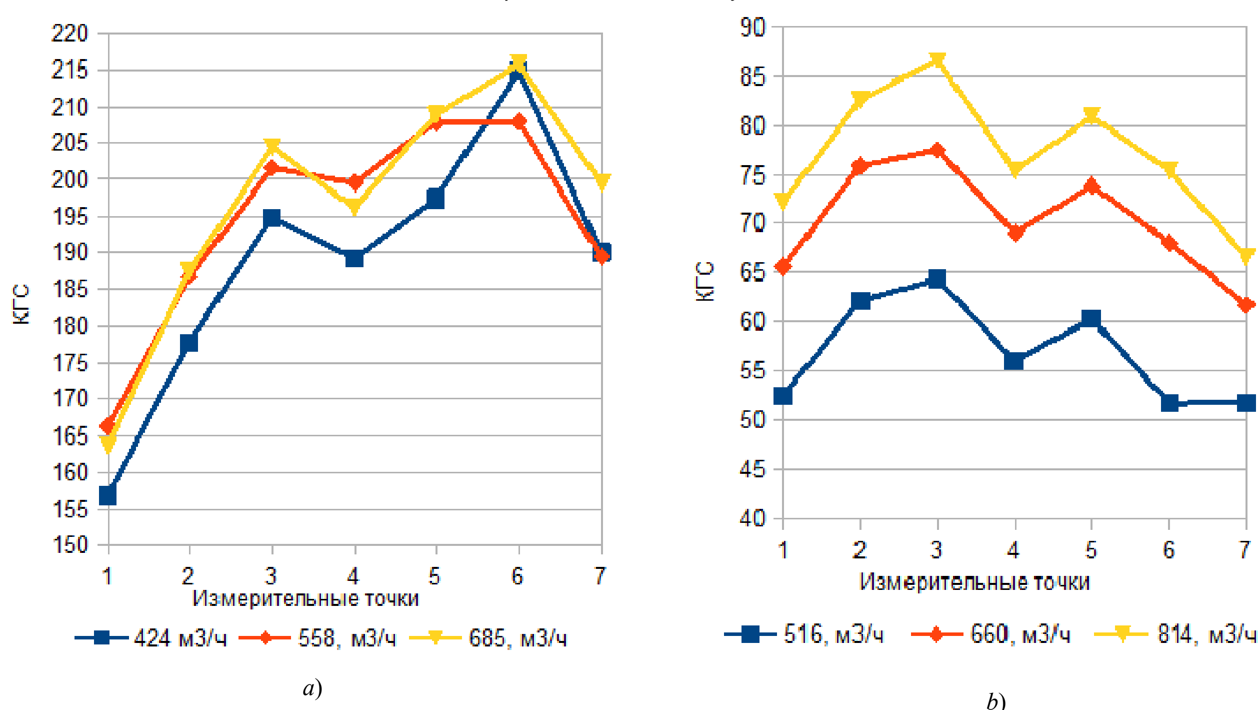


Рис. 9. Коэффициент гидравлического сопротивления при различных режимах работы вентилятора циклонов «ЦН-15у-300» (*a*) и «ЦОК-200-300» (*b*)

Fig. 9. Hydraulic resistance coefficient under various fan operating modes of "TsN15u-300" (a), and "CSC -200-300" cyclones (b)

Таким образом, полученные результаты позволяют утверждать, что КГС аппарата «ЦОК-200-300» в 2–2,2 раза меньше КГС «ЦН-15у-300» за счет более высокой скорости потока воздуха в теле аппарата.

Выводы. Результаты проведенных испытаний позволяют сделать следующие выводы.

1. С увеличением производительности сравниваемых циклонных аппаратов наблюдается рост КГС.

2. При сравнении коэффициентов гидравлического сопротивления (КГС) аппаратов экспериментально доказано, что величины КГС «ЦОК-200-300» в 2–2,2 раза меньше КГС «ЦН-15у-300» за счет более высокой скорости потока в теле аппарата.

3. Полученные результаты свидетельствуют о лучших аэродинамических характеристиках циклона с обратным конусом и, возможно, более высокой эффективности пылеулавливания за счет увеличенной степени турбулизации потоков.

4. Для последующей проверки полученных выводов необходимы дальнейшие экспериментальные исследования на полупромышленной установке, в том числе на запыленных потоках.

Библиографический список

1. Потемкина, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования влияния глубины погружения выхлопного патрубка на аэродинамические свойства и эффективность циклонных аппаратов / А. В. Потемкина, Е. С. Лукаш // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 4 (47). — С. 526–533.

2. Features of Velocity and Pressure Fields Formation in the Centrifugal Dust Collector / Y. Buligin [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 698. — P. 542–545.

3. Cyclone with Controlled Parameters and Self-Emptying Bin for Air Dedusting in Machine Building Plants / B. Ch. Meskhi [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 682. — P. 46–52.

4. Пылеулавливатель : патент 2506880 A47L 9/16 Рос. Федерация / Б. Ч. Месхи [и др.]. — № 2012155164/12 ; заявл. 18.12.12 ; опубл. 20.02.14, Бюл. № 5. — 7 с.

5. Установка для пылеулавливания : патент 2557741 A47L 9/16 Рос. Федерация / Б. Ч. Месхи [и др.]. — № 2014136881/12 ; заявл. 11.09.14 ; опубл. 27.07.15, Бюл. № 21. — 4 с.

6. Экспериментальные установки для исследования влияния формы и геометрии конструкции центробежных пылеуловителей на их аэродинамические характеристики и эффективность пылеулавливания / Ю. И. Булыгин [и др.] // Новые направления модернизации педагогического образования в формировании здорового образа жизни и безопасности жизнедеятельности : мат-лы V регион. науч.-практ. конф. Южного федерального округа 7 декабря 2016 года. — Краснодар : ИПЦ КубГУ, 2017. — С. 200.

7. Трубки напорные модификации НИОГАЗ и ПИТО. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / ООО НПО «ЭКО-ИНТЕХ». — Режим доступа: http://www.eco-intech.com/img/AVimg/Brochure/instr%20trubki.pdf (дата обращения: 01.08.17).

8. Testo 521/526. Руководство пользователя [Электронный ресурс] / ООО «Тесто Рус». — Режим доступа: http://www.energo-snab.ru/upload/iblock/71e/71e6ab7415a3308288cda88a94dde7a7.pdf (дата обращения: 01.08.17).

9. Testo. ComSoft 3.4. Руководство пользователя [Электронный ресурс] / ООО «Тесто Рус». — Режим доступа: https://media.testo.com/media/19/b8/457afbfcf6a6/instrukciya-testo-comsoft-basic.pdf (дата обращения: 01.08.17).

10. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. ГОСТ 17.2.04.06-90 / Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Москва : Издательство стандартов, 2003. — 11 с.

11. Ветошкин, А. Г. Инженерная защита окружающей среды от вредных выбросов / А. Г. Ветошкин. — Москва : Инфра-Инженерия, 2016. — 416 с.

12. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители. Справочник / В. А. Лазарев. — Нижний Новгород : «Фирма ОЗОН-НН», 2006. — 320 с.

References

1. Potemkina, A.V., Lukash, E.S. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya glubiny pogruzheniya vykhlopnogo patrubka na aerodinamicheskie svoystva i effektivnost' tsiklonnykh apparatov. [Theoretical and experimental study of the influence of immersion depth of the exhaust pipe on the cyclone apparatus aerodynamic properties and efficiency.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 4 (47), pp. 526–533 (in Russian).

2. Buligin, Y., et al. Features of Velocity and Pressure Fields Formation in the Centrifugal Dust Collector. Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 698, pp. 542–545.

3. Meskhi, B. Ch., et al. Cyclone with Controlled Parameters and Self-Emptying Bin for Air Dedusting in Machine Building Plants. Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 682, pp. 46–52.

4. Meskhi, B. Ch., et al. Pyleulavlivatel': patent 2506880 A47L 9/16 Ros. Federatsiya. [Dust collector.] Patent RF, no. 2506880, 2014 (in Russian).

5. Meskhi, B. Ch., et al. Ustanovka dlya pyleulavlivaniya: patent 2557741 A47L 9/16 Ros. Federatsiya. [Dust-precipitating plant.] Patent RF, no. 2557741 A47L 9/16, 2015 (in Russian).

6. Bulygin, Y.I., et al. Eksperimental'nye ustanovki dlya issledovaniya vliyaniya formy i geometrii konstruktsii tsentrobezhnykh pyleuloviteley na ikh aerodinamicheskie kharakteristiki i effektivnost' pyleulavlivaniya. [Pilot plants for studying the effect of shape and geometry of centrifugal dust collector design on their aerodynamics and dust collection efficiency.] Novye napravleniya modernizatsii pedagogicheskogo obrazovaniya v formirovanii zdorovogo obraza zhizni i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: mat-ly V region. nauch.-prakt. konf. Yuzhnogo federal'nogo okruga 7 dekabrya 2016 goda. [New areas of pedagogical education modernization in the formation of healthy lifestyle and safety of life: Proc. V Region. Sci.-Pract. Conf. of Southern Federal District, December 7, 2016.] Krasnodar: IPTs KubGU, 2017, p. 200 (in Russian).

7. Trubki napornye modifikatsii NIOGAZ i PITO. Rukovodstvo po ekspluatatsii. [Pressure tubes of NIIOGAZ and PITO modification. Instruction manual.] OOO NPO «EKO-INTEKh». Available at: http://www.eco-intech.com/img/AVimg/Brochure/instr%20trubki.pdf (accessed: 01.08.17) (in Russian).

8. Testo 521/526. Rukovodstvo pol'zovatelya. [Testo 521/526. User’s manual.] OOO «Testo Rus». Available at:

http://www.energo-snab.ru/upload/iblock/71e/71e6ab7415a3308288cda88a94dde7a7.pdf (accessed: 01.08.17) (in Russian).

9. Testo. ComSoft 3.4. Rukovodstvo pol'zovatelya. [Testo. ComSoft 3.4. User's manual.] OOO «Testo Rus». Available at: https://media.testo.com/media/19/b8/457afbfcf6a6/instrukciya-testo-comsoft-basic.pdf (accessed: 01.08.17) (in Russian).

10. Okhrana prirody. Atmosfera. Metody opredeleniya skorosti i raskhoda gazopylevykh potokov, otkhodyashchikh ot statsionarnykh istochnikov zagryazneniya: GOST 17.2.04.06-90. [State standard. Nature protection. Atmosphere. Methods for determination of velocity and flowrate of gas-and-dust streams from stationary sources of pollution.] CIS Council for Standardization, Metrology and Certification. Moscow: Standartinform, 2003, 11 p. (in Russian).

11. Vetoshkin, A. G. Inzhenernaya zashchita okruzhayushchey sredy ot vrednykh vybrosov. [Engineering protection of the environment from harmful emissions.] Moscow: Infra-Inzheneriya, 2016, 416 p. (in Russian).

12. Lazarevв, V.A. Tsiklony i vikhrevye pyleuloviteli. Spravochnik. [Cyclones and vortex dust collectors. Reference book.] Nizhniy Novgorod: "Firma OZON-NN", 2006, 320 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 14.06.2017
Сдана в редакцию 14.06.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 14.06.2017
Submitted 14.06.2017
Scheduled in the 17.07.2017

Об авторах:

Булыгин Юрий Игоревич,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0644-7412
bulyur_rostov@mail.ru

Азимова Наталья Николаевна,
аспирантка кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды», старший преподаватель кафедры «Прикладная математика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9484-2430
arkomaazimov@mail.ru

Купцова Ирина Сергеевна,
аспирантка кафедры "Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды" Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2236-0384
i-kyptsova@mail.ru

Authors:

Bulygin, Yury I.,
professor of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0644-7412
bulyur_rostov@mail.ru

Azimova, Natalia N.,
postgraduate student of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), senior lecturer of the Applied Mathematics Department,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9484-2430
arkomaazimov@mail.ru

Kuptsova, Irina S.,
postgraduate student of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2236-0384
i-kyptsova@mail.ru